

Descripción de los Aspectos Fundamentales en Sistemas de Descompresión y Alivio de Presión  
en el Procesamiento de Gas Natural

Brain José Pérez Franco y Andrés Felipe Segura Barajas

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Petróleos

Director

Germán González Silva

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Natalia Prieto Jiménez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Fundamentos Teóricos de las Causas de Sobrepresión.....	17
2.1 Sistemas de alivio .....	17
2.2 Causas de sobrepresión.....	18
2.2.1 Salidas cerradas.....	19
2.2.2 Enfriamiento o fallo de reflujo.....	22
2.2.3 Sobrellenado .....	22
2.2.4 Explosiones internas o sobretensiones de presión transitorias .....	23
2.2.5 Fuego externo.....	24
3. Tasas de Alivio .....	25
3.1 Efectos de la presión, la temperatura y la composición.....	26
3.2 Simulación dinámica.....	26
3.3 Salidas cerradas.....	27
3.4 Enfriamiento o fallo de reflujo.....	28
3.4.1 Fallo de agua de enfriamiento al condensador.....	28

---

3.5 Sobrellenado .....	30
3.6 Explosiones internas o sobretensiones de presión transitorias .....	33
3.6.1 Explosiones internas .....	33
3.6.2 Sobretensiones de presión transitorias .....	33
3.7 Fuego exterior .....	34
3.7.1 Dimensionamiento de válvulas de alivio: fuego exterior .....	35
3.7.2 Metodología para el cálculo de presiones .....	37
4. Planta Compresora C-1 .....	42
4.1 Ubicación .....	43
4.2 Operación .....	44
4.3 Unidades motocompresoras .....	47
4.4 Flujos máxicos a aliviar desde las unidades motocompresoras .....	48
4.5 Red de tuberías del sistema de alivio .....	50
4.6 Válvulas de alivio de la planta C-1 .....	54
5. Evaluación .....	57
5.1 Fuego exterior en el recipiente .....	61
5.2 Configuración original .....	66
5.3 Configuración actual .....	68
5.4 Fallo en el sistema .....	69
5.5. Solución propuesta .....	73
6. Análisis del Caso .....	79
7. Conclusiones .....	82
Referencias .....	84

---

Apéndices..... 87

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Características de los compresores de la planta C-1</i> .....	48
Tabla 2. <i>Análisis cromatográfico y otras propiedades del gas de succión de la planta C-1</i> . ....	51
Tabla 3. <i>Características de la red de tuberías del sistema de alivio de la planta C-1</i> .....	54
Tabla 4. <i>Válvulas de seguridad de las unidades motocompresoras de la planta C-1</i> .....	55
Tabla 5. <i>Válvula de alivio sobre el separador de la planta C-1</i> .....	56
Tabla 6. <i>Cálculo de la relación Cp/Cv del gas natural a la succión de la planta C-1</i> .....	56
Tabla 7. <i>Análisis cualitativo de criticidad de los posibles escenarios de sobrepresión a considerar en la evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1</i> . ....	59
Tabla 8. <i>Cálculos para la configuración original del caso: fuego exterior</i> .....	67
Tabla 9. <i>Cálculos para la configuración actual del caso: fuego exterior</i> . ....	69
Tabla 10. <i>Aumento carga de alivio en 1000kg/h</i> .....	70
Tabla 11. <i>Aumento carga de alivio en 2500 kg/h</i> . ....	71
Tabla 12. <i>Aumento carga de alivio en 4200kg/h</i> .....	71
Tabla 13. <i>Aumento máximo carga de alivio en 4300 kg/h</i> .....	72
Tabla 14. <i>Cálculos para la configuración actual del caso: fuego exterior</i> .....	72
Tabla 15. <i>Cálculos solución propuesta</i> .....	74
Tabla 16. <i>Cálculos para diámetro 10 in</i> .....	75

---

Tabla 17. <i>Cálculos para diámetro 12 in</i> .....	75
Tabla 18. <i>Cálculos para diámetro 14 in</i> .....	76
Tabla 19. <i>Cálculos para diámetro 16 in</i> .....	76
Tabla 20. <i>Comparativo del factor de seguridad para cada válvula de alivio</i> .....	80
Tabla 21. <i>Comparativo del factor de seguridad para cada válvula de alivio.</i> .....	81

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Flujo de alivio por salida bloqueada en recipientes.</i> .....	21
Figura 2. <i>Enfoque tradicional para la prevención de sobrellenado - sistemas manuales basados en medición de nivel puntual</i> .....	32
Figura 3. <i>Enfoque moderno para la prevención de sobrellenado.</i> .....	32
Figura 4. <i>Algoritmo de aplicación del método de las aproximaciones sucesivas</i> .....	40
Figura 5. <i>Ubicación planta compresora C-1.</i> .....	44
Figura 6. <i>Entrada (azul) y succión (verde) de la planta compresora C-1.</i> .....	45
Figura 7. <i>Descarga (rojo) y alivio (azul) de la planta compresora C-1</i> .....	46
Figura 8. <i>Tubería al quemador (flare) de la planta compresora C-1.</i> .....	47
Figura 9. <i>Discretización en tramos del sistema de alivio de la planta compresora C-1</i> .....	53
Figura 10. <i>Esquemático para la configuración original del caso: fuego exterior.</i> .....	67
Figura 11. <i>Esquemático para la configuración actual del caso: fuego exterior</i> .....	68
Figura 12. <i>Variación de la presión en las tuberías de alivio respecto a su diámetro</i> .....	78

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Hoja de Especificaciones (Data Sheet) del Separador de la Planta C-1 .....	87
Apéndice B. Cálculo del Perfil de Contrapresiones para la Configuración Original de la Planta C-1.....	88

## Resumen

**Título:** Descripción de los Aspectos Fundamentales en Sistemas de Descompresión y Alivio de Presión en el Procesamiento de Gas Natural\*

**Autores:** Brain José Pérez Franco, Andrés Felipe Segura Barajas\*\*

**Palabras Clave:** Sobrepresión, Sistemas de alivio, Planta compresora.

### Descripción:

Los sistemas de alivio de presión son dispositivos indispensables en una planta de procesamiento de gas natural ya que están diseñados para operar cuando la presión interna de un recipiente supera un umbral establecido. Su función principal es prevenir fallas en los equipos y/o tuberías con el fin evitar pérdidas importantes tanto materiales como humanas debido a una posible explosión. Estos sistemas se encuentran diseñados para proteger, cuidar y preservar las instalaciones por posibles fallas que interfieren en la estabilidad y eficiencia del proceso, garantizando la producción y operación de la planta de procesamiento de gas natural.

La sobrepresión se traduce en la acumulación de masa y energía, producto de un desbalance o interrupción del flujo por eso es importante conocer las causas por las cuales se genera una sobrepresión en el sistema, debido a que cada causa de sobrepresión descrita por la norma API 521 tiene un modo de respuesta particular, esto con el fin de determinar las tasas de alivio adecuadas para que la planta de procesamiento de gas natural continúe operando de manera eficiente y segura. En este trabajo se llevará a cabo un estudio del sistema de alivio de presión en la planta compresora C-1 que se encuentra ubicada en la localidad de Temblador, Edo. Monagas, con el fin de determinar su eficiencia ante una posible falla por fuego exterior debido al cambio de su infraestructura original en sus unidades motocompresoras, asimismo se evaluará la capacidad máxima del sistema de alivio y se presentará una solución alternativa para mejorar las condiciones de la planta compresora de gas C-1.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva, Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Natalia Prieto Jiménez, Doctor en Ingeniería Química

**Abstract**

**Title:** Description of fundamental aspects in Decompression Systems and Pressure Relief in Natural Gas Processing\*

**Author:** Brain José Pérez Franco, Andrés Felipe Segura Barajas\*\*

**Key Words:** Overpressure, Relief Systems, Compressor Plant.

**Description:**

Pressure relief systems are indispensable devices in a natural gas processing plant as they are designed to operate when the internal pressure of a vessel exceeds a set threshold. Its main function is to prevent failures in equipment and/or pipes to avoid significant losses both material and human due to a possible explosion. These systems are designed to protect, care for and preserve the facilities from possible failures that interfere with the stability and efficiency of the process, guaranteeing the production and operation of the natural gas processing plant.

Overpressure translates into the accumulation of mass and energy, the product of an imbalance or interruption of the flow, so it is important to know the causes for which an overpressure is generated in the system, because each cause of overpressure described by the API standard 521 has a particular response mode, this in order to determine the appropriate relief rates for the natural gas processing plant to continue operating efficiently and safely. In this work, a study of the pressure relief system in the C-1 compressor plant will be carried out, which is located in the town of Temblador, Edo. Monagas, in order to determine its efficiency in the event of a possible failure due to external fire due to the change of its original infrastructure in its motor-compressor units, the maximum capacity of the relief system will also be evaluated and an alternative solution will be presented to improve the conditions of the C-1 gas compression plant.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director: Germán González Silva, Doctor in Chemical Engineering. Co-director: Natalia Prieto Jiménez, Doctor in Chemical Engineering

**Lista de Símbolos y Abreviaturas**

V	Volumen
P	Presión
dP	Diferencial de presión
$\Delta P$	Variación de la presión en el segmento de tubería
dx	Diferencial de longitud en la dirección x
dq	Diferencial de calor
dM	Diferencial del número de Mach
M	Número de Mach
A	Área
$C_p$	Calor específico a presión constante
$C_v$	Calor específico a volumen constante
Z	Factor de compresibilidad
R	Constante del gas (constante universal/peso molecular del gas)
T	Temperatura
$\dot{T}$	Temperatura de la mezcla
t	Tiempo
$f'$	Factor de fricción de Fanning
$f'_{sup}$	Factor de fricción de Fanning supuesto
$f'_{calc}$	Factor de fricción de Fanning calculado f Factor de fricción de Moody
L	Longitud de tubería
$L_t$	Longitud total (longitud de tubería + longitud equivalente de accesorios)

Ma	Número de Mach, según la definición de la norma API 521
$\dot{m}$	Flujo másico
MW	Peso Molecular del fluido
$\dot{M}W$	Peso Molecular de la mezcla
Re	Número de Reynolds
W	Carga de alivio
Q	Caudal de gas en la tubería
Q <sub>T</sub>	Caudal total de la planta
Tol	Tolerancia para el método de las aproximaciones sucesivas
C	Velocidad de la onda de presión
E <sub>B</sub>	Módulo de Elasticidad del fluido
E	Módulo de Elasticidad del material de la tubería
e	Espesor de pared de la tubería
D <sub>o</sub>	Diámetro exterior de la tubería
t <sub>p</sub>	Tiempo de propagación de la onda de presión
P <sub>m</sub>	Presión manométrica en la tubería antes de la onda de choque
D	Diámetro interno de la tubería
S <sub>y</sub>	Límite de fluencia del material de la tubería
Tol	Tolerancia para el método de las aproximaciones sucesivas
P <sub>1</sub>	Presión de alivio
T <sub>1</sub>	Temperatura de alivio
P <sub>n</sub>	Presión de operación
T <sub>n</sub>	Temperatura de operación

$P_{set}$	Presión prefijada de apertura
$P_{atm}$	Presión atmosférica
$T_w$	Temperatura máxima de la pared del recipiente durante un incendio
$h_L$	Pérdidas locales o puntuales en los accesorios
$h_c$	Pérdidas continuas o por rozamiento en la tubería
$L_{EQ}$	Longitud equivalente de tubería
$K$	Coefficiente empírico para la determinación de pérdidas locales
$g$	Aceleración de gravedad
$\rho$	Densidad del fluido
$d\rho$	Diferencial de densidad
$\tau_w$	Esfuerzo cortante en la pared
$\gamma$	Relación de calores específicos $\gamma = C_p / v$
$\varepsilon$	Rugosidad absoluta de la tubería
$\mu$	Viscosidad del fluido $v$ Velocidad del fluido en la tubería
$dv$	Diferencial de velocidad
$\Delta v$	Variación de la velocidad del fluido en la tubería
$\zeta$	Coefficiente adimensional de presiones (P1/P2)
$\zeta_{sup}$	Coefficiente adimensional de presiones (P1/P2) supuesto
$\zeta_{calc}$	Coefficiente adimensional de presiones (P1/P2) calculado
$\psi$	Factor de seguridad
$\rho$	Densidad del fluido
$d\rho$	Diferencial de densidad
$\tau_w$	Esfuerzo cortante en la pared

**Abreviaturas**

BHP	Potencia al freno (break horse power)
MMSCFD	Millones de pies cúbicos estándar por día
SCFM	Pies cúbicos estándar por minuto
C.S.B.	Chemical Safety Board
U.S.A.	United States of América
MAWP	Presión Máxima Permisible de Trabajo

## Introducción

Las plantas de procesamiento de gas y cualquier instalación operativa que represente alguna facilidad de superficie, son equipos de alta tecnología que operan a determinadas temperaturas y presiones de operación y diseño, las cuales deben ser eficientes para trabajar bajo condiciones muy estrictas de operabilidad y seguridad, por ende, es importante involucrar las partes de diseño y uso de un sistema de alivio y descompresión adecuado; el trabajo específico de estos equipos es evitar las fallas estructurales de dispositivos o tuberías por el exceso de presión que superan el umbral preestablecido y así evitar una posible explosión, ocasionando importantes pérdidas tanto materiales como humanas.

Finalmente, con base en esta investigación, se emiten unas conclusiones acerca de la determinación y clasificación de los sistemas de alivio de presión y, de esta manera establecer el diseño y los equipos más adecuados para una mayor eficiencia en las plantas de procesamiento de gas.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Describir los aspectos fundamentales en sistemas de descompresión y alivio de presión en el procesamiento de gas natural.

### 1.2 Objetivos Específicos

Describir las causas de sobrepresión que se generan en el sistema de una planta de procesamiento de gas natural basados en las presiones de operación y diseño.

Determinar las tasas de alivio recomendadas en los sistemas de descompresión y alivio de presión.

Determinar el cambio en la eficiencia del sistema de alivio al modificar la configuración de la planta compresora de gas C-1.

## 2. Fundamentos Teóricos de las Causas de Sobrepresión

### 2.1 Sistemas de alivio

Los sistemas de alivio de presión están diseñados para proteger las instalaciones de sobrepresiones producidas por fallas mecánicas y/u operacionales derivadas del proceso, reduciendo los datos de presión del sistema a valores seguros en caso de contingencias, a través de la purga del sistema manteniendo la estabilidad y eficiencia de los procesos de separación, de esta manera se garantiza la continuidad segura de las operaciones de producción en la planta. El sistema de alivio de presión está conformado por dispositivos de alivio de presión, el sistema de venteo, tuberías y medios de disposición final colocados en las instalaciones para la recolección, transporte y disposición segura de alivios generados cuando se activan las válvulas de seguridad de la planta (Lira Finol, 2011).

Los sistemas de alivio de presión representan un tipo de facilidades de superficie que son indispensables para un buen desarrollo de la planta de gas, debido a que estos sistemas de alivio de presión y descompresión representan el límite ante el rompimiento catastrófico de algún equipo en superficie generado por un exceso de presión en su interior.

Para cada componente del equipo que podría estar sujeto a sobrepresión debe seleccionarse el tipo adecuado entre la gran variedad de válvulas de alivio y otros dispositivos disponibles. Para la selección de un sistema de alivio de presión se debe tener en cuenta distintos parámetros que hacen que un proceso de descompresión sea eficiente, para ello se deben tener en cuenta factores como el tipo de servicio, capacidad de temperatura, presión, y materiales de fabricación de esta.

## 2.2 Causas de sobrepresión

La sobrepresión es la consecuencia de un desbalance o interrupción del flujo, que generan acumulación de masa y energía en el sistema, por ello existen distintas causas que generan los excesos de presión y, por ende, el diseñador debe considerar esos efectos e instalar los medios de alivio correspondientes.

- Salidas cerradas en recipientes
- Apertura inadvertida de válvulas
- Fallas de servicio
- Pérdida de ventiladores
- Pérdida de aire de instrumentos o energía eléctrica
- Falla en intercambiadores de calor

La mayoría de los objetos dentro de una planta de procesamiento de gas están diseñados para contener y mantener la presión del sistema, ya sean en recipientes a presión, intercambiadores de calor, equipos operativos y tuberías para el transporte de gas, dicho diseño está basado en distintos criterios como (American Petroleum Institute [API STD 521], 2020):

- a) La presión de operación normal a temperaturas de funcionamiento.
- b) El efecto de cualquier combinación de alteraciones del proceso que puedan ocurrir durante las operaciones normales.
- c) El diferencial entre las presiones de funcionamiento y de ajuste del dispositivo de alivio de presión.

d) El efecto de cualquier combinación de cargas internas suplementarias, como la cabeza estática y las cargas externas, como un terremoto o el viento.

Durante el desarrollo de este capítulo, se analizarán las principales causas de sobrepresión donde se supera la Presión de Trabajo Máxima Permitida (MAWP) y/o la presión de diseño.

La sobrepresión dentro de un sistema se puede generar por varias razones ya que es el resultado de un desequilibrio o interrupción del flujo, por consiguiente, se genera una acumulación de este fluido o energía en alguna parte del sistema entrando en sobrepresión algunos equipos dentro de la planta. La sobrepresurización de un equipo puede ser el resultado de una sola causa, o de una combinación de varios eventos. El identificar todos los posibles escenarios de sobrepresión que pudiesen ocurrir durante la operación de una planta, es el primer paso en el diseño y evaluación de sus sistemas de alivio (Viggiani Pérez, 2010). Para evitar que se genere una sobrepresión y no arriesgar la integridad de la planta y el personal, es necesario realizar un estudio y análisis de las causas que puedan generar la sobrepresión dentro del sistema y así de esta manera se pueda llevar a cabo el diseño para fijar una tasa mínima de descarga en los dispositivos de alivio de presión y se pueda evitar que los recipientes y equipos no superen la presión de operación máxima permitida.

Cuando se inicia el diseño de una planta de procesamiento de gas para evitar las sobrepresiones, se debe mantener una jerarquía de protección que está determinada por analizar, evitar y reducir todos los riesgos, seguidamente por implementar controles de ingeniería que proporcionen seguridad de forma automática y finalmente controles administrativos (API, 2020).

### ***2.2.1 Salidas cerradas***

Las salidas cerradas son una de las razones por las que se genera sobrepresión dentro de un sistema, debido al cierre involuntario de una válvula a la salida de un equipo mientras esté

operando, por lo que compromete directamente la integridad del equipo a superar la presión máxima permitida o dicho de otra forma, causar que su presión interna se incremente hasta exceder su presión de diseño, generando el riesgo de una falla estructural. Cuando se realiza el análisis ingenieril para el diseño de una planta de procesamiento de gas y se analiza cada equipo, se determina que, el cierre involuntario de una válvula o el aislamiento de éste debido a ese cierre procede a que el equipo supere su máxima presión permitida, es indispensable el uso de dispositivos de alivio de presión (API, 2020), asimismo, se considera que disminuir el uso de válvulas de bloqueo entre los equipos también puede reducir el uso de implementar dispositivos de alivio de presión.

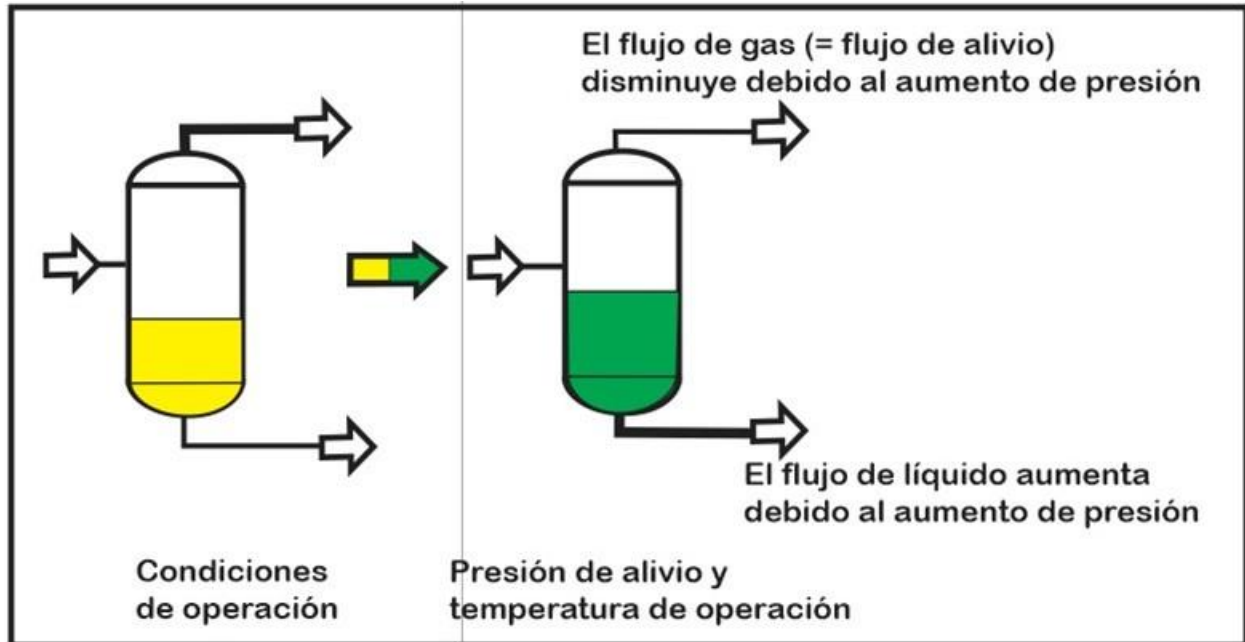
Dentro de las salidas cerradas existen distintos fenómenos por lo que se pueda presentar la sobrepresión por salida cerrada, en las que se encuentran las salidas bloqueadas en recipientes o líneas, a la descarga de una bomba y a la descarga de un compresor.

- **Salidas bloqueadas en recipientes o líneas:** Esta condición ocurre cuando por lo menos una válvula de bloqueo se cierra exponiendo al recipiente o línea a una mayor presión superando la máxima presión permitida. Uno de los orígenes de este caso, es el cierre inadvertido de la válvula de bloqueo en la línea de salida de gas de un recipiente, donde se considera que el flujo de gas remanente es equivalente al flujo de alivio, generalmente esto disminuye el flujo de gas debido a la condensación originada por el aumento de presión y considera que tanto el recipiente como las secciones aguas arriba han aumentado su presión, lo que cambia el equilibrio termodinámico (Inelectra, A.A, 2009). Cuando ocurre este bloqueo del recipiente, se estima un tiempo aproximado de 20 minutos, donde se considera que si el recipiente se llena en menos de este tiempo se aprecia

una sobrepresión, por el contrario, si pasa más de este tiempo no se considerará una sobrepresión por salida cerrada.

### Figura 1.

*Flujo de alivio por salida bloqueada en recipientes.*



Otro origen por el que se genera la sobrepresión es por la salida bloqueada a la descarga de una bomba. Si es el caso de una bomba centrífuga, el bloqueo de una válvula aguas abajo provoca que la bomba alcance la presión de cierre, por lo que el sistema no requiere protección de alivio para este escenario si la bomba, la tubería y otros equipos aguas abajo están diseñados para soportar la presión máxima de cierre de la bomba (API, 2020), por lo que el criterio de diseño considera que no se requiere una protección ante esta sobrepresión; sin embargo, cuando en el diseño se tienen bombas de desplazamiento positivo, la norma API STD 521 menciona que sí se requiere

protección de un dispositivo de alivio de presión para proteger la misma bomba y el resto del equipo.

### ***2.2.2 Enfriamiento o fallo de reflujó***

Este tipo de sobrepresión que afecta a los recipientes del sistema puede generarse por distintas fuentes de fallos, como de equipos eléctricos o mecánicos que proporcionan al proceso refrigeración o condensación en las corrientes de flujo. La pérdida de reflujó como resultado de un fallo de la bomba o del instrumento puede causar sobrepresión en una columna debido a la inundación del condensador o la pérdida de refrigerante en el proceso de fraccionamiento (API, 2020). Otro fallo común para que se genere sobrepresión y por ende este fenómeno, es el fallo de los ventiladores de los intercambiadores de calor o de las torres de refrigeración ya que se vuelven inactivos, generado por la pérdida de potencia o una avería mecánica.

El fallo por refrigeración o enfriamiento se puede producir como se mencionó anteriormente y de igual manera, por un fallo eléctrico y/o paro de las bombas de impulsión de agua de refrigeración.

### ***2.2.3 Sobrellenado***

En el sistema de una planta de procesamiento de gas hay muchos recipientes de proceso o sobretensión incluyendo las torres y columnas, que tienen un nivel de líquido presente operando en condiciones normales; en algunas ocasiones y por experiencia se ha demostrado que estos recipientes se pueden someter a un sobrellenado bajo condiciones específicas; una de estas condiciones es cuando se genera un desbalance como en los casos en los que se produzca un desbalance entre la entrada y la salida de producto líquido y que el llenado se realice por bombas

u otros medios que aporten una presión igual o superior a la presión de diseño del depósito, por lo que se debe considerar este escenario en el diseño del dispositivo de alivio (Baizán Verdejo, 2019), por lo tanto, la capacidad requerida se obtendría de manera similar la sobrepresión por salida cerradas. Si en medio del sistema alguna línea de alimentación o suministro puede alcanzar a exceder la presión de ajuste del dispositivo de alivio y/o la presión de diseño del equipo, se considerará el sobrellenado, el cual se puede presentar de la siguiente manera (API, 2020):

- Llenado excesivo con las bombas de carga
- Una fuga a través de una válvula en un sistema que trabaje a más presión
- Una rotura en los tubos de un intercambiador de calor que utilice un fluido a más presión

que el sistema objeto de estudio.

#### ***2.2.4 Explosiones internas o sobretensiones de presión transitorias***

Cuando se generan explosiones internas en el ámbito industrial, se pueden definir como la liberación repentina de energía, causadas por la ignición de mezclas vapor-aire en las que la velocidad de la llama es subsónica, se proporciona cierta protección pero no con válvulas de alivio sino con discos de ruptura o paneles de ventilación, debido a que la reacción de respuesta de estos dispositivos es de milisegundos, mientras que las válvulas de alivio son dispositivos que reaccionan muy lentamente para alcanzar a proteger el recipiente contra la acumulación de presión extremadamente rápida causada por la propagación de las llamas.

Los sistemas de alivio no deben utilizarse en casos en donde la detonación se considera un hecho muy probable, debido a que, si se presentan explosiones se deben mitigar impidiendo la formación de mezclas que puedan detonar.

### 2.2.5 Fuego externo

Una causa de sobrepresión dentro de un sistema se puede deber a la exposición de fuego en el equipo debido a la generación de vapor (ya sea por la ebullición de un líquido o una reacción de descomposición) o expansión del fluido. A pesar de esto, la exposición de fuego también puede ocasionar sobrecalentamiento no solo en los recipientes sino en sus paredes debido a que la exposición al fuego también puede causar sobrecalentamiento de las paredes del recipiente, lo que resulta en una reducción de la resistencia del material (API, 2020). Los incendios se caracterizan en piscina abierta, en piscina confinada e incendios a reacción.

Los incendios en la piscina generalmente ocurren por un derrame de líquido encendido, mientras que un incendio a chorro resulta de una fuga presurizada encendida. Respecto al flujo de calor, estos dos fenómenos se diferencian en que el incendio en la piscina el flujo de calor es bajo y no localizado y en el de chorro es mucho más alto y localizado. Dependiendo del caso que se presente, las intensidades de calor del fuego pueden variar de gran manera por el combustible, la ventilación, la tasa de liberación entre otros factores. Los rangos en los que puede estar la intensidad de calor son las siguientes:

- Fuego de piscina abierta: 15850 Btu/h\*ft<sup>2</sup> a 47550 Btu/h\*ft<sup>2</sup>
- Fuego a piscina confinada: 31700 Btu/h\*ft<sup>2</sup> a 79250 Btu/h\*ft<sup>2</sup>
- Fuego a reacción: 31700 Btu/h\*ft<sup>2</sup> a 126800 Btu/h\*ft<sup>2</sup>

Debido a que el fuego es una causa común de sobrepresión en tuberías y recipientes a presión, debe asumirse que el área efectiva de exposición al fuego oscila entre 2500 y 5000 ft<sup>2</sup> (esto suponiendo círculos de 58 a 80 ft de diámetro) (Viggiani Pérez, 2010), por lo que se debe tener una altura efectiva no mayor a 25 ft sobre el suelo.

Cada vez que se realizan los análisis por fuego exterior, se debe suponer que el recipiente a presión se encuentra aislado del resto de la planta, por lo tanto, los vapores que se generen por el incremento de la temperatura del líquido deben ser desalojados.

### **3. Tasas de Alivio**

Para determinar las tasas de alivio en cada sistema de descompresión y alivio de presión, existen ciertas reglas, pero siempre la prioridad será el buen juicio ingenieril en vez de seguir estrictamente las normas. Los mejores resultados para concluir las mejores tasas de alivio deben ser en los que se obtenga los mejores datos operativos, económicos y mecánicamente factibles con el fin de evitar colocar en peligro la seguridad de la planta de procesamiento de gas natural y su personal.

Las velocidades de líquido o vapor utilizadas para determinar los requisitos de alivio están determinadas por la entrada de energía al sistema. Las dos formas más comunes de energía son la entrada de calor, que aumenta la presión a través de la vaporización o expansión térmica, y la otra forma de energía es la entrada de presión directa de fuentes de presión más altas, por ende, la sobrepresión puede ser producida por alguna de las dos fuentes o las dos.

La tasa máxima de alivio individual es la velocidad máxima a la que se reducirá la presión para proteger el equipo contra la sobrepresión debida a cualquier causa única (API, 2020).

### **3.1 Efectos de la presión, la temperatura y la composición**

La presión y temperatura se deben considerar para determinar las tasas de alivio individuales, ya que estos dos componentes afectan el comportamiento volumétrico y composicional de los líquidos y los vapores. Hay que tener en cuenta que la velocidad a la que se genera el vapor cambia con las condiciones de equilibrio debido a que aumenta la presión en un espacio confinado y el contenido de calor de las corrientes que continúan fluyendo dentro y fuera del equipo.

Durante el alivio de la presión, se deben investigar los cambios en las tasas de vapor y las masas moleculares relativas en varios intervalos de tiempo para determinar la tasa máxima de alivio y la composición del vapor (API, 2020).

Puesto que es necesario conocer y tener en cuenta los efectos que pueden tener en el fluido debido a que el calor introducido en estos no alcanza su temperatura crítica en condiciones de alivio de presión, lo cual produce un vapor rico en componentes de baja ebullición, y a medida que continúa la entrada de calor, el vapor se va enriqueciendo con componentes más pesados. Así mismo, es importante considerar que se irán vaporizando los componentes más pesados si y solo si la entrada de calor al sistema es suficiente.

### **3.2 Simulación dinámica**

Actualmente, se puede encontrar varios tipos de simulaciones, las simulaciones dinámicas y las simulaciones en estado estacionario. Las simulaciones en estado estacionario son consideradas conservadoras y pueden generar un sobre dimensionamiento del sistema de alivio

(Inelectra, A.A, 2009). A su vez, la simulación dinámica es utilizada en el diseño del sistema de alivio para poder medir los aumentos de presión transitorios o para calcular las tasas de alivio requeridas de los dispositivos de alivio de presión individuales, así mismo, en el futuro estas simulaciones tendrán unos mejores resultados, permitiendo una mejor determinación en los flujos de alivio, pero lo más importante es que gracias a estas, se podrá comprender las situaciones de alivio que se puedan llegar a presentar en el sistema.

### 3.3 Salidas cerradas

Para determinar las tasas de alivio por salidas cerradas, se puede suponer que las válvulas manuales o de accionamiento remoto que normalmente están abiertas y funcionan en el instante del cierre y, además, el cierre involuntario de una válvula en la salida del equipo a presión mientras éste está en corriente, puede exponer el equipo a una presión que supera el MAWP (API, 2020).

Asimismo, se deben analizar todas las posibles fallas que puedan afectar simultáneamente a las válvulas, de esta manera con un análisis ingenieril se puede asegurar que las válvulas sean independientes y no se vean afectadas por la falla primaria que cause la sobrepresión en el sistema.

La cantidad de material que se debe liberarse se determina en condiciones que corresponden a condiciones de alivio y no a condiciones normales de operación. La tasa de alivio requerida normalmente se reduce notablemente cuando se considera esta diferencia en las condiciones.

Ahora bien, la salida bloqueada de la corriente de líquido en un separador bifásico o trifásico puede originar un rebose del líquido. Se indica que un rango comúnmente aceptado de respuesta de los operadores es de 10 min a 30 min, dependiendo de la complejidad de la instalación. Si el tiempo de residencia del líquido dentro del separador con la salida bloqueada es mayor de 10

min, existe la posibilidad de descartar la salida de bloqueada de líquido como un a causa creíble de sobrepresión (API, 2020), así mismo cuando un evento de este tipo ocurra, se debe contar con un sistema de alerta adecuado, esto con el fin de poder alertar a todo el personal que se encuentra en operaciones de una posible emergencia, por ejemplo, (alarmas de alto nivel, LAH).

Otra condición que se debe tener en cuenta para determinar la velocidad de alivio requerida es el efecto de la caída de presión por fricción en la línea de conexión entre la fuente de sobrepresión y el sistema protegido.

### **3.4 Enfriamiento o fallo de reflujo**

#### ***3.4.1 Fallo de agua de enfriamiento al condensador***

La tasa de alivio requerida para la sobrepresión por el fallo de agua de enfriamiento al condensador está determinada por un balance de calor y material en el sistema a la presión de alivio.

Por lo tanto, en el fallo de agua de enfriamiento al condensador los vapores ya no se condensan y la masa a sustituir en este caso, es la diferencia entre la masa total que entra al condensador y el vapor que se está desalojando.

Existen diferentes causas por las cuales, se podría llegar a presentar un fallo en el sistema de enfriamiento, que pueden ir desde un fallo en el suministro de electricidad hasta un cierre de una válvula, las causas más comunes son (Inelectra, A.A, 2009):

- Cierre inadvertido de una válvula manual en la línea del fluido de enfriamiento, por ejemplo, aguas arriba o aguas abajo de un condensador.

- Parada de las bombas de suministro de agua de enfriamiento debido a la falla de energía eléctrica.
- Parada de los ventiladores en los intercambiadores de calor por aire o en las torres de enfriamiento de tiro mecánico.
- Parada del sistema de refrigeración, por ejemplo, debido a un disparo del compresor o por muy alto nivel en algún separador del sistema.

Así mismo, estos fallos en el agua de enfriamiento se traducen en el sistema como problemas operacionales, puesto que esto podría traer consigo una serie de inconvenientes, comenzando con un aumento en la temperatura en el condensador, debido a que el fluido de enfriamiento no está retirando calor del proceso y posterior a esto, una posible sobrepresión en el sistema de los equipos que se encuentren aguas abajo o aguas arriba del intercambiador de calor.

- **Condensación total:** La masa a sustituir es el flujo total de vapor que entra al condensador, recalculado a la nueva composición del vapor a la temperatura correspondiente y a la presión de ajuste más la sobrepresión. La capacidad de sobretensión del acumulador superior en el nivel normal de líquido se limita generalmente a menos de 10 min (API, 2020). Si la falla de enfriamiento supera ese tiempo, se perderá el refluo, y se tendrá cambios significativos en la composición del vapor.

- **Condensación parcial:** La masa a sustituir en este caso, es la diferencia entre el flujo de vapor total que entra y el flujo de vapor que normalmente no se condensa.

### 3.5 Sobrellenado

A nivel general, se pueden encontrar diferentes tipos de niveles de líquidos presentes en el sistema, ya sea en condiciones normales, en medio del proceso o apagado, y en recipientes ya sean de proceso o de sobretensión. El sobrellenado de un tanque puede tener consecuencias desastrosas. Un derrame puede provocar explosiones e incendios que pueden esparcirse a todos los tanques en los tanques de almacenamiento y el área circundante. Ya que los tanques contienen grandes cantidades de energía almacenada, un incendio puede tener consecuencias de gran alcance.

Así mismo, los incendios provocados por sobrellenado han representado daños y perjuicios legales superiores a mil millones de dólares. Desde esta perspectiva, y desde muchas otras, evitar el sobrellenado del tanque es extremadamente importante (Hagg, Sandberg, 2017). Para ello es necesario realizar una evaluación periódica en la que se monitorean las presiones de origen, ajuste y diseño del equipo, y de esta manera poder llevar a cabo la evaluación del sobrellenado. Generalmente esto se efectúa si la presión de origen de una línea de alimentación o suministro de líquido puede exceder la presión de ajuste del dispositivo de alivio y/o la presión de diseño del equipo

Existen diferentes opciones de diseño en el sistema, las cuales permiten trabajar con el sobrellenado de líquidos dentro del sistema, así mismo estas no se limitan a (API, 2020):

- Aumentar la presión de diseño del sistema y/o PRD establecer la presión dentro de las asignaciones de código de diseño de presión;
- Diseñar un sistema de alivio de presión que pueda acomodar de forma segura el sobrellenado

- Instalación de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) para evitar el sobrellenado de líquidos”

Cuando se conozcan cuáles son las opciones de diseño para el sistema, el operador deberá ser riguroso y hacer una evaluación minuciosa en todas las fases de funcionamiento, para de esta manera poder evaluar su correcta operatividad, fases de funcionamiento como la puesta en marcha y otras operaciones no rutinarias, en las que las condiciones del proceso como, por ejemplo, caudales, temperatura y densidad entre otras, puedan llegar a ser variables a las condiciones normales, puesto que la seguridad y la protección de sobrellenado son una preocupación importante para cualquier planta de tanques que se utilice para el almacenamiento de líquido.

La prevención moderna de sobrellenado se basa en una perspectiva holística con un entendimiento del hecho de que una multitud de elementos contribuyen a minimizar el riesgo de sobrellenado de un tanque, y no solo el equipo señalado como sistema de prevención de sobrellenado (Hagg, Sandberg, 2017).

Es debido a esto que la industria se encaminó rápidamente hacia ese enfoque moderno mencionado anteriormente, con el fin de poder encontrar una solución mucho más efectiva a las ya conocidas. Este enfoque moderno, se basa principalmente en un sistema automático de prevención de sobrellenado (AOPS) con medición continua de nivel.

Las figuras 2 y 3, muestran un paralelo en el avance del estudio acerca del sobrellenado en los tanques de almacenamiento, se puede observar claramente como este sistema ha sido mejorado, con el fin de primero garantizar la seguridad de la planta de procesamiento de gas natural y segundo brindar una mayor eficiencia al proceso.

Figura 2.

Enfoque tradicional para la prevención de sobrellenado - sistemas manuales basados en medición de nivel puntual

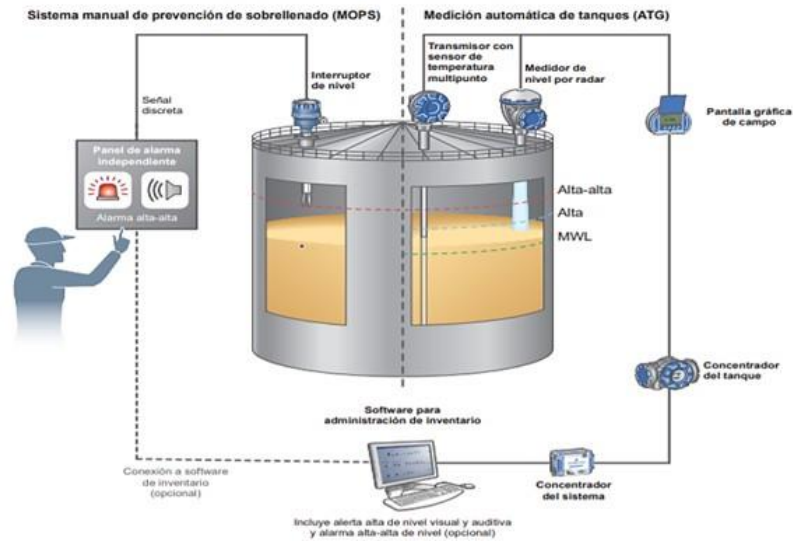
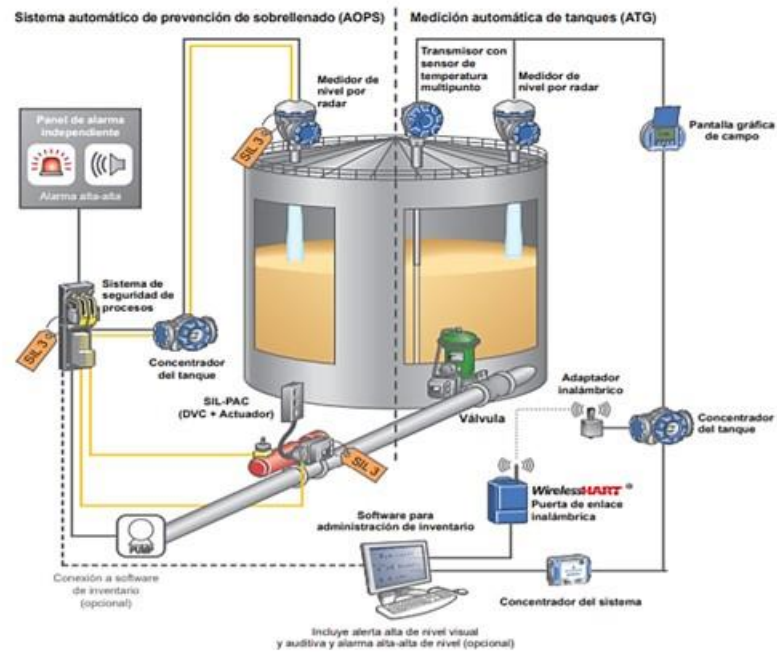


Figura 3.

Enfoque moderno para la prevención de sobrellenado.



### 3.6 Explosiones internas o sobretensiones de presión transitorias

#### 3.6.1 Explosiones internas

Para controlar las explosiones internas, se debe utilizar discos de ruptura o paneles de ventilación de explosión, no válvulas de alivio. Estos dispositivos responden en milisegundos (API, 2020), a diferencia de los dispositivos de alivio como las válvulas, su accionamiento es lento, y no suficiente para proteger la integridad del recipiente contra una rápida acumulación de presión, debida a la propagación interna producida por la explosión.

#### 3.6.2 Sobretensiones de presión transitorias

- **Martillo de agua:** El martillo de agua hace referencia a ondas de choque hidráulicas, es un tipo de sobrepresión que no puede ser controlados por los dispositivos típicos de alivio de presión ya que la respuesta de las válvulas de estos dispositivos es muy lenta. Este tipo de fenómeno produce muchos picos de presión oscilantes los cuales aumentan la presión por encima de su funcionamiento normal en cuestión de milisegundos. Por lo tanto, el martillo de agua se evita con frecuencia limitando la velocidad a la que las válvulas se pueden cerrar en tuberías largas.

Así mismo esto traería consigo, grandes consecuencias en el sistema, esto debido a los daños que este fenómeno puede llegar a ocasionar. Este evento puede darse por una incorrecta selección de la válvula o un mantenimiento inadecuado de estas. Ciertas válvulas, como las de retención oscilantes, de retención de disco basculante y las válvulas de retención de doble puerta también pueden contribuir a problemas de golpe de ariete (Bregman, 2017). Debido a que el funcionamiento de estas válvulas es propenso a golpear, ya que su forma de operar se basa en

invertir el flujo y la contrapresión para empujar el disco hacia atrás en el asiento de modo que la válvula se cierre.

Ahora bien, ignorar el golpe de ariete puede resultar en una falla catastrófica de su sistema de flujo. Los efectos a largo plazo del golpe de ariete pueden incluir daños en la bomba, fugas, tubos rotos, accidentes, entre otros.

- **Martillo de vapor:** El martillo de vapor es una oleada de presión oscilante, el cual ocurre en tuberías que contienen fluidos comprimibles. Generalmente se presenta el martillo de vapor por el cierre rápido de las válvulas y debido a que es un fenómeno que ocurre en milisegundos, muchas veces se generan vibraciones y movimientos violentos en las tuberías llegando a una posible ruptura. La mejor manera de evitar el martillo de vapor no es con los dispositivos de alivio de presión ya que estos tienen una respuesta lenta ante este fenómeno, la manera correcta es evitando el uso de válvulas de cierre rápido.

### 3.7 Fuego exterior

Normalmente como se mencionó en el capítulo anterior, cuando se presenta fuego externo en un recipiente se supone que este está aislado con el fin de simplificar los análisis. El abono de rutas de flujo que permanecen abiertas durante un evento de sobrepresión suele ser una práctica aceptable (API, 2020), a pesar de esto, se debe reconocer que los operadores o servicio de emergencia pueden intentar aislar ciertas líneas y recipientes durante estas condiciones con el fin de mitigar la propagación del fuego y apagar de forma segura la unidad.

### 3.7.1 Dimensionamiento de válvulas de alivio: fuego exterior

Las válvulas de alivio como se ha descrito anteriormente son dimensionadas dependiendo de la contingencia que vaya a generar el máximo flujo (carga de alivio).

Para el caso de fuego exterior, el área de descarga de válvulas de alivio para recipientes a presión, que contienen únicamente gases o vapores sometidos a fuego exterior, puede ser estimada utilizando la ecuación (Viggiani Pérez, 2010):

$$A = \frac{F' A'}{\sqrt{P_1}} \quad (1)$$

Donde:

A: Área efectiva de descarga de la válvula, [in<sup>2</sup>]

A': Área del recipiente expuesta al fuego, [ft<sup>2</sup>]

P<sub>1</sub>: Presión absoluta de alivio de la válvula, [psi]

F': Puede ser determinado usando la ecuación 2, si al ser calculado resulta ser menor que 0,01, por lo tanto, se recomienda utilizar F' = 0,01. Si no se cuenta con información suficiente para evaluar la ecuación 2, por ende, se recomendaría utilizar F' = 0,045.

$$F' = \left( \frac{0,1406}{CKd} \right) \left( \frac{(T_w - T_1)^{1,25}}{T_1^{0,6506}} \right) \quad (2)$$

Donde:

T<sub>w</sub>: Temperatura máxima de la pared del recipiente, [R]

T<sub>1</sub>: Temperatura absoluta del fluido durante el alivio de la válvula, [R]

Kd: Coeficiente de descarga, puede ser obtenido del fabricante, sin embargo, un valor típico utilizado para dimensionamiento preliminar de válvulas de alivio es 0,975.

La constante C de la ecuación 2 se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$C = 520 \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{Cp}{Cv} \quad (4)$$

La temperatura T1 utilizada en la ecuación 2 se determina utilizando la ecuación:

$$T1 = \left( \frac{P1}{Pn} \right) Tn \quad (5)$$

Donde:

Pn: Presión absoluta de operación del recipiente, [psi]

Tn: Temperatura absoluta de operación del recipiente, [R]

La carga de alivio en [lb/h] puede ser calculada de la siguiente manera:

$$W = 0,1406 \sqrt{M_w P1} \left( \frac{A' (T_w - T1)^{1,25}}{T1^{1,1506}} \right) \quad (6)$$

Donde  $M_w$  es el peso molecular del fluido aliviado.

### 3.7.2 Metodología para el cálculo de presiones

Los sistemas de alivio están integrados por redes de tuberías, los cuales transportan el gas expulsado a través válvulas de alivio cuando se presentan contingencias, desde los equipos protegidos hacia la estaca de venteo la cual ya se encuentra ubicada fuera de los límites de la planta donde se puede descargar el gas en la atmósfera sin ningún problema.

Durante el alivio, el flujo de gas a través de las tuberías hace que la presión inicial del sistema (por lo general, presión atmosférica) se eleve progresivamente hasta desarrollarse en toda la red un perfil de contrapresiones (Viggiani Pérez, 2010). Por lo tanto, al momento de generar las contrapresiones si llegan a incrementarse hasta superar la presión de alivio, las válvulas se cerrarían y la descarga de gas en los equipos se detendrían, provocando el riesgo de falla.

A continuación, se presenta el procedimiento a seguir para el cálculo del perfil de contrapresiones:

**Paso 1:** Se deben obtener todos los datos necesarios y relevantes los cuales están agrupados en ciertas categorías:

*Características del proceso:*

$\dot{m}$ : Carga de alivio [kg/h]

P2: Presión absoluta de salida del segmento [kgf/cm<sup>2</sup>]

T2: Temperatura del gas a la salida del segmento [K]

*Características de la tubería:*

$\varepsilon$ : Rugosidad absoluta de la tubería [mm]

L: Longitud del segmento [m]

D: Diámetro del segmento [m]

*Características de los accesorios:*

# Codos: (L/D)<sub>EQ</sub>: L<sub>EQ</sub>: [m]

# Válvulas: (L/D)<sub>EQ</sub>: L<sub>EQ</sub>: [m]

# Tees: (L/D)<sub>EQ</sub>: L<sub>EQ</sub>: [m]

*Propiedades del fluido:*

M<sub>w</sub>: Peso molecular del gas, [kg/kmol]

Z: Compresibilidad del gas, (adimensional)

$\gamma$ : Relación de calores específicos del gas, (adimensional)

$\mu$ : Viscosidad del gas, [kg/m.s]

**Paso 2:** Cálculo de la densidad del fluido a la salida del segmento ( $\rho_2$  [kg/m<sup>3</sup>]), utilizando la ecuación de gas ideal corregida,

$$\rho_2 = \frac{P_2 M_w}{Z R T_2} \quad (7)$$

**Paso 3:** Cálculo del caudal de gas a la salida ( $Q_2$  [m<sup>3</sup>/s]) del segmento,

$$Q_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2} \quad (8)$$

**Paso 4:** Cálculo de la velocidad del gas a la salida ( $v_2$  [m/s]) del segmento,

$$v_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (9)$$

**Paso 5:** Cálculo del número de Reynolds a la salida del segmento,

$$Re_2 = \frac{\rho_2 v_2 D}{\mu} \quad (10)$$

**Paso 6:** Cálculo del factor de fricción de Fanning ( $f'$ ),

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = -4 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,256}{Re \sqrt{f'}} \right) \quad (11)$$

De otra forma, esta ecuación quedaría de la siguiente forma,

$$f'_{calc} = \frac{1}{\left( -4 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,256}{Re \sqrt{f'_{sup}}} \right] \right)^2} \quad (12)$$

Donde:

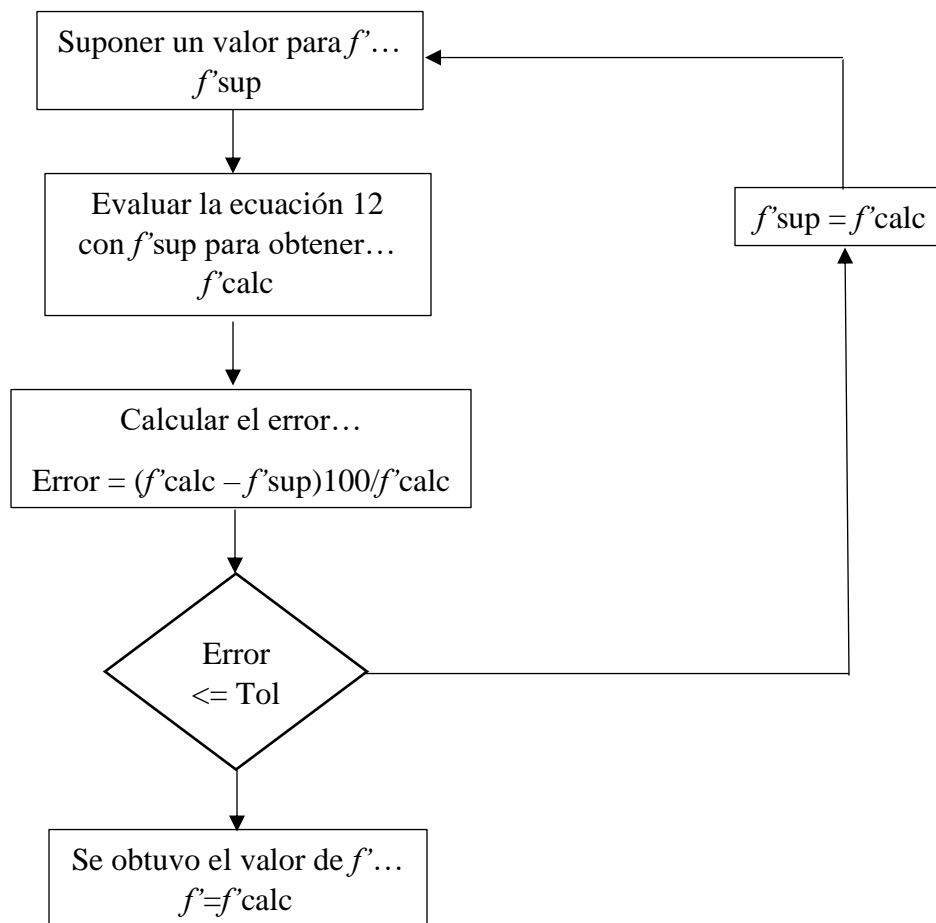
$f^{\text{sup}}$ : Valor supuesto del factor de fricción de Fanning

$f^{\text{calc}}$ : Valor calculado del factor de fricción de Fanning

Para poder aplicar la ecuación anterior, se debe realizar mediante el método iterativo de las aproximaciones sucesivas como se describe a continuación:

**Figura 4.**

*Algoritmo de aplicación del método de las aproximaciones sucesivas*



Enseguida, el factor de fricción de Moody, se puede obtener a partir del factor de fricción de Fanning,

$$f = 4f' \quad (13)$$

**Paso 7:** La longitud total de tubería puede ser determinada, sumando la longitud de tubería recta más las longitudes equivalentes de las pérdidas de accesorios,

$$L_t = L + \sum_{i=1}^N Leq(i) \quad (14)$$

**Paso 8:** El número de Mach a la salida puede ser calculado utilizando la siguiente ecuación,

$$Ma_2 = 3,23 \times 10^{-5} \left( \frac{\dot{m}}{P_2 D^2} \right) \left( \frac{Z T_2}{M_w} \right)^{0,5} \quad (15)$$

**Paso 9:** La presión a la salida del segmento de tubería ( $P_2$ ) se determina aplicando el modelo de flujo compresible isotérmico, expresado de la siguiente manera,

$$\frac{1}{Ma^2} \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^2 \right] - \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 = \frac{f L_t}{D} \quad (16)$$

Ahora para simplificar la ecuación anterior, se utiliza un cambio de variable  $\zeta = P_1/P_2$ , se puede obtener la siguiente expresión,

$$\frac{1}{Ma^2} (\zeta^2 - 1) - \ln(\zeta^2) - \frac{fLt}{D} = 0 \quad (17)$$

Reacomodando la ecuación anterior, se obtiene,

$$\zeta_{calc} = \sqrt{\left( \ln(\zeta_{sup}^2) + \frac{fLt}{D} \right) Ma^2 + 1} \quad (18)$$

Ahora aplicando el método de las aproximaciones sucesivas para la ecuación anterior, se realizan las iteraciones para obtener el valor de  $\zeta$ .

#### 4. Planta Compresora C-1

El propósito fundamental de una planta compresora de gas es aumentar la presión del gas natural asociado al petróleo proveniente de los yacimientos desde un nivel menor de presión a un nivel mayor de presión con el objeto de extraer petróleo a través de los sistemas de levantamiento artificial (Locomale, 2013).

Las plantas compresoras son instalaciones que consta de varios compresores, equipo de tratamiento auxiliar e instalaciones de tuberías para bombear gas natural bajo presión a grandes distancias (Schlumberger, 2021), estas son accionadas por motores de combustión interna y normalmente están instaladas en el interior de las edificaciones por su protección y, asimismo, facilitar los trabajos de operación y mantenimiento.

Las unidades motocompresoras constan de una o más etapas de compresión, no excediéndose las cinco etapas (Viggiani Pérez, 2010), esto permite tener una disposición de las unidades en paralelo, de esta manera se evita que la operación se detenga cuando una de ellas falle ya que por esta configuración las demás unidades pueden continuar la operación.

#### **4.1 Ubicación**

La planta compresora C-1, es operada por la empresa operadora Petrodelta la cual recibe el gas proveniente del campo Uracoa del sur del Estado Monagas. Este campo está relacionado con dos estaciones de flujo las cuales se agrupan en dos zonas (este y oeste).

La primera estación de flujo que es UM-1, situada en la parte este del campo Uracoa por la vía de Temblador hacia El Fangal que recibe la producción de los pozos en las áreas de El Fangal, Carrizales y Los Aceites, respectivamente.

La segunda estación de flujo llamada UM-2, está situada a 10 km de Temblador al oeste del campo Uracoa recibe la producción asociada de las locaciones de Café Molido, El Berraco, Mis Querencias y El Venado.

**Figura 5.**

*Ubicación planta compresora C-1.*



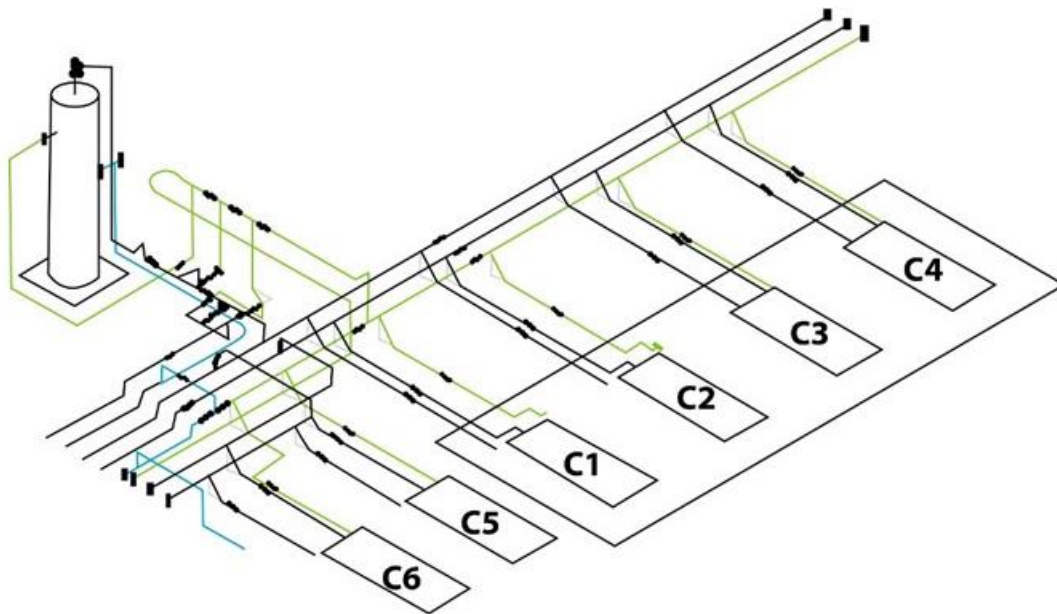
Nota. Adaptado de venciopedia.

## 4.2 Operación

La operación de esta planta compresora inicia cuando el gas producido en las estaciones de flujo UM-1 y UM-2 entra al sistema (ver figura 6 trazado azul claro) por medio de un sistema de tuberías donde se dirige directamente hacia el separador donde el gas es despojado de cualquier líquido que pueda contener. Después de este procedimiento, el gas es dirigido por la tubería que conforman la red de succión (ver figura 6 trazado verde) hacia el múltiple de succión ( $P=40$  psig y  $T=98$  °F), donde es atrapado por las unidades motocompresores para ser comprimido.

**Figura 6.**

*Entrada (azul) y succión (verde) de la planta compresora C-1.*



Después de que el gas recorre las distintas etapas de compresión en las unidades motocompresoras, el gas a alta presión (1650 psig) es empujado hacia el múltiple de descarga (ver figura 7 trazado rojo) donde ya abandona la planta compresora; cabe resaltar que este gas en esta planta es utilizado para la reinyección de los pozos productores.

En la figura 7 por el trazado azul esta expresada la red de tuberías que hacen parte del sistema de alivio conformado también por sus válvulas de alivio, la cual es fundamental para la protección de la planta compresora que, en este caso, se hace referencia a las unidades motocompresoras y el separador de que sufran alguna sobrepresión ya sea por fuego exterior, salida bloqueada, entre otros.

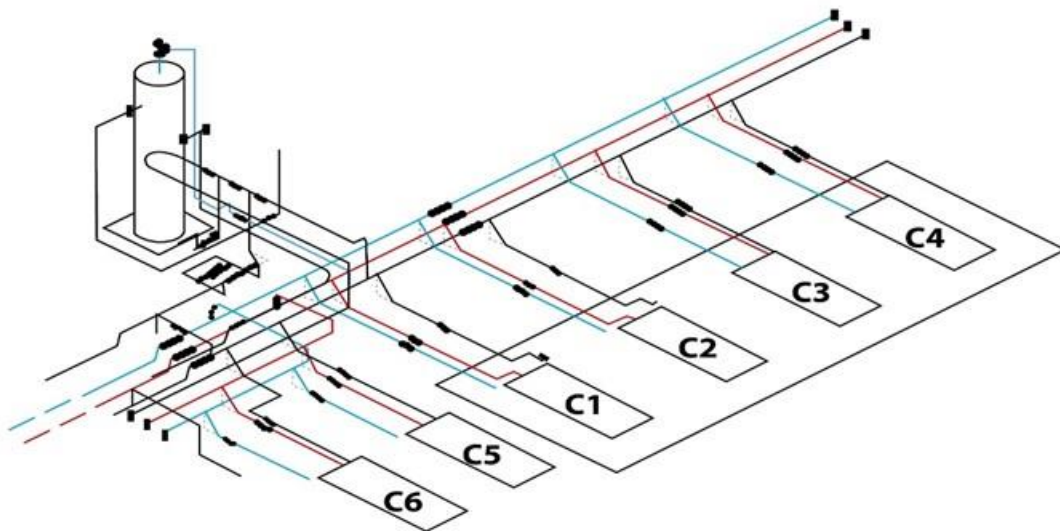
En el caso específico de la planta compresora C-1, las válvulas de alivio se abren para proporcionar la descarga de gas de ciertos equipos hacia la red de alivio, de allí hacia el múltiple de alivio donde ya se recolecta el gas y luego es expulsado fuera de los límites de la planta mediante

una tubería subterránea y, finalmente el gas es descargado al medio ambiente a través del *stack* de unos 8 m de longitud. Cuando se descarga este flujo de gas al medio ambiente se realiza bajo el criterio de caudales pequeños, de lo contrario, son vertidos los caudales al medio ambiente a través del quemador.

La descarga al quemador se realiza mediante la red de tuberías de la figura 8 con el trazado morado, la cual se encuentra controlada por una válvula instrumentada que monitorea la presión de succión de las unidades motocompresoras constantemente, y en el caso que esta presión se eleve por encima del límite preestablecido (45 psig), la válvula se abre dando paso de gas hacia el quemador hasta que la presión se reestablezca a sus condiciones de operación normales (40 psig).

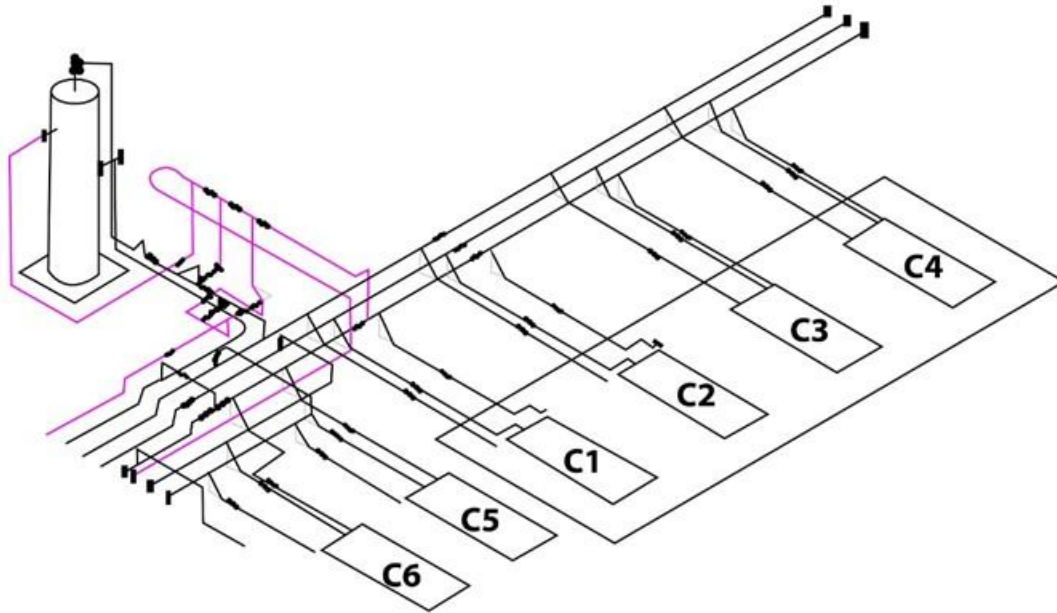
### Figura 7.

*Descarga (rojo) y alivio (azul) de la planta compresora C-1*



**Figura 8.**

*Tubería al quemador (flare) de la planta compresora C-1.*



### 4.3 Unidades motocompresoras

A la planta compresora C-1 llega el gas producido de las estaciones de flujo UM-1 y UM-2 a una presión de 45 psig, el cual lo comprime a una presión de 1650 psig para luego utilizarlo en reinyección y en levantamiento artificial de crudo por gas, esta planta tiene una capacidad máxima de compresión de 45 MMSCFD.

Esta planta compresora está constituida por tres trenes de compresión con las siguientes características:

- El primer tren de compresión está formado por dos compresores recíprocos en paralelo de tres etapas cada uno, nombrados K1 y K2, cada uno con una capacidad de 8,5 MMSCFD.

- El segundo tren de compresión está formado por dos compresores reciprocantes en paralelo de cuatro etapas cada uno, nombrados K3 y K4, cada uno con una capacidad de 7,8 MMSCFD.
- El tercer tren de compresión está formado por dos compresores reciprocantes en paralelo de tres etapas cada uno, nombrados K5 y K6, cada uno con una capacidad de 4,5 MMSCFD.

#### 4.4 Flujos máxicos a aliviar desde las unidades motocompresoras

Aquí se realizarán una serie de cálculos para hallar los flujos máxicos que se tendrán que aliviar de cada unidad motocompresora partiendo de los caudales de cada unidad.

**Tabla 1.**

*Características de los compresores de la planta C-1*

Unidad	Marca Motor	Modelo Motor	Potencia (BHP)	Modelo Compresor	N° Etapas de Compresión	Capacidad (MMSCFD)
K1	Wuakesha	12-AT25GL	2500	Dresser 6HOS-3	3	8,5
K2	Wuakesha	12-AT25GL	2500	Dresser 6HOS-3	3	8,5
K3	Wuakesha	12-AT25GL	2500	Dresser 6HOS	4	7,8
K4	Wuakesha	12-AT25GL	2500	Dresser 6HOS	4	7,8
K5	Caterpillar	G3606	2500	Ariel	3	4,5
K6	Caterpillar	G3606	2500	Ariel	3	4,5

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

$$Q_1 = Q_2 = 8,5 \text{ MMSCFD} = 9562,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_3 = Q_4 = 7,8 \text{ MMSCFD} = 8775,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_5 = Q_6 = 4,5 \text{ MMSCFD} = 5062,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 41,6 \text{ MMSCFD} = 46800 \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal de gas es,

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} = \frac{V}{t} \quad (19)$$

Así mismo,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (20)$$

Entonces,

$$m = \rho V \quad (21)$$

El flujo másico puede ser definido como,

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho V}{t} = \rho Q \quad (22)$$

La densidad del gas a condiciones normales (@ 15 °C = 60 °F) puede ser obtenida de la tabla 4 que fue proporcionada para este caso estudio,

$$\rho = 0,7567 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces los flujos másicos que se deben aliviar procedentes de las unidades motocompresoras pueden ser calculados de la siguiente manera,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \rho_1 Q_1 = 0,7567 \frac{kg}{m^3} * 9562,5 \frac{m^3}{h} = 7235,95 \frac{kg}{h} \cong 7236 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \rho_3 Q_3 = 0,7567 \frac{kg}{m^3} * 8775,0 \frac{m^3}{h} = 6640,04 \frac{kg}{h} \cong 6640 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \rho_5 Q_5 = 0,7567 \frac{kg}{m^3} * 5062,5 \frac{m^3}{h} = 3830,79 \frac{kg}{h} \cong 3831 \frac{kg}{h}$$

#### 4.5 Red de tuberías del sistema de alivio

En este inciso, se clasificará toda la red de tuberías por tramos donde se describirán las características geométricas más resaltantes que conforman el sistema de alivio de la planta compresora, asimismo, se describirán los flujos másicos que cada tramo.

**Tabla 2.***Análisis cromatográfico y otras propiedades del gas de succión de la planta C-1.*

<b>Fecha muestreo</b>	1-ago-08
<b>Descripción de la muestra</b>	Estación UM-2 (Succión C1)
<b>Número de cilindro</b>	CLMA-61
<b>Condiciones de muestreo</b>	50,0 lpcm @93,0 °F
<b>Comentarios</b>	H <sub>2</sub> S= 6ppm, Vapor de H <sub>2</sub> O=6mg/L

<b>Componente</b>		<b>% Molar</b>	<b>%Peso</b>
H <sub>2</sub>	Hidrógeno	0	0
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de Hidrógeno	0	0
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	1,87	4,61
N <sub>2</sub>	Nitrógeno	5,47	8,58
C1	Metano	89,75	80,64
C2	Etano	1,97	3,32
iC3	Propano	0,72	1,79
iC4	i-Butano	0,04	0,14
nC4	n-Butano	0	0
C5	Neo-Pentano	0,01	0,04
iC5	i-Pentano	0,02	0,08
nC5	n-Pentano	0,02	0,06
C6	Hexanos	0,04	0,19
	Metil-Ciclopentano	0,01	0,06
	Benceno	0	0
	Ciclohexano	0,01	0,07
C7	Heptano	0,02	0,12
	Metil-Ciclohexano	0,02	0,1

Componente	% Molar	%Peso
Tolueno	0,01	0,03
C8 Octanos	0,01	0,06
Etilbenceno	0	0
M/P- Xileno	0	0
D-Xileno	0	0,01
C10 Nonanos	0,01	0,05
C11 Decanos	0	0,02
Undecanos	0	0,01
<b>TOTALES</b>	100	100,0

Propiedades Calculadas De Los Residuos	Peso	Densidad (gcm <sup>3</sup> )
	Molecular	@60°F
C7+ Heptanos más	99,9	0,7513
C8+ Octanos más	109,3	0,7566
C10+ Decanos más	137	0,7807
C11+ Undecanos más	147	0,789

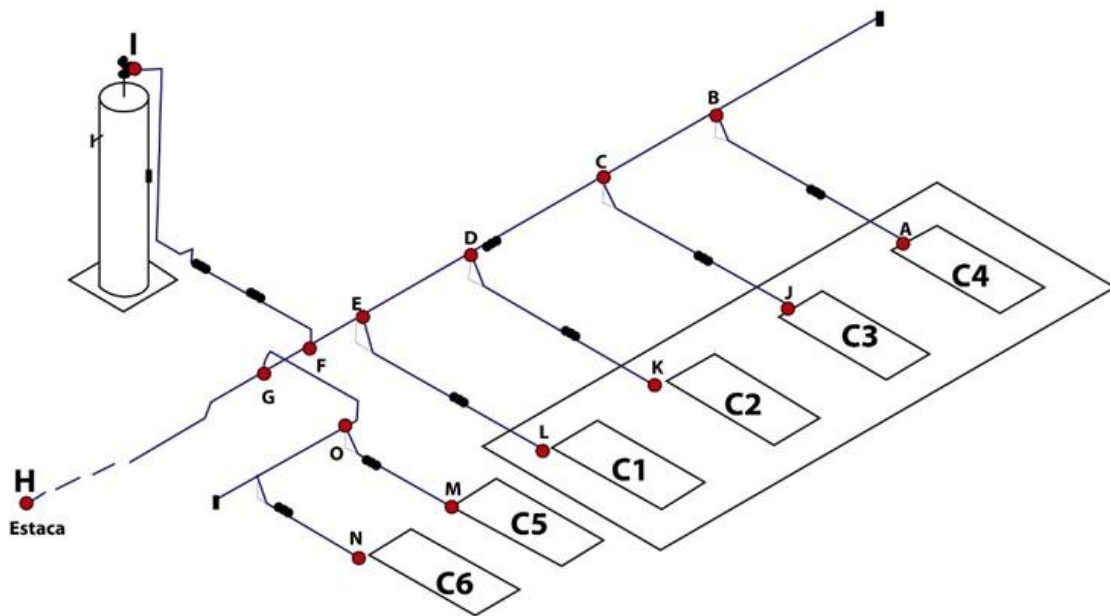
Propiedades Calculadas Del Gas Total		
Densidad relativa del gas	0,6177	(Air=1 @ 14,73 lpca & 60°F)
Peso molecular	17,85	gmol <sup>1</sup>
Densidad real del gas	0,7567	Kgm <sup>3</sup> @ 15°C
Valor calorífico bruto ideal	972,1	BTU pie <sup>3</sup> @ 14,73 lpca, @ 60°F
Valor calorífico neto ideal	876,4	BTU pie <sup>3</sup> @ 14,73 lpca, @ 60°F
Presión pseudo-crítica	664,9	lpca
Temperatura pseudo-crítica	348,2	Rankine
Factor de compresibilidad Z	0,9979	(@ 14,73 lpca % 60°F)

Propiedades Calculadas Del Gas Total		
Viscosidad del gas	0,011	Cp
GPM (C2+)	0,786	
GPM (C3+)	0,262	

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

**Figura 9.**

*Discretización en tramos del sistema de alivio de la planta compresora C-1*



En la tabla 3 es importante destacar que el flujo másico o la carga de alivio proveniente del recipiente a presión  $\dot{m}_{IF}$ , el cuál es calculado mediante un procedimiento específico para el escenario de sobrepresión por salida bloqueada, por ende, el parámetro  $\dot{m}_{IF}$ , se determinará después de estudiar este escenario de sobrepresión; cabe resaltar que el término  $\dot{m}_{IF}$  depende del escenario de sobrepresión y no del funcionamiento de la planta en condiciones normales.

**Tabla 3.***Características de la red de tuberías del sistema de alivio de la planta C-1.*

Tramo	L (m)	D (in)	Schedule	# Codos	# Válvulas	# Tees	$\dot{m}$ (kg/h)
A – B	12	4	STD	1	1	1	6640
C – J	12	4	STD	1	1	1	6640
B – C	12	10	STD	0	0	0	6640
C – D	12	10	STD	0	1	0	13280
D – K	12	4	STD	1	1	1	7236
D – E	12	10	STD	0	0	0	20516
E – L	12	4	STD	1	1	1	7236
E – F	3	10	STD	0	0	0	27752
I – F	18	4	STD	6	2	1	$\dot{m}_{IF}$
F – G	5	10	STD	0	0	0	$27752 + \dot{m}_{IF}$
G – O	6	3	STD	4	1	1	7662
O – M	6	3	STD	1	1	1	3831
O – N	12	3	STD	1	1	1	3831
G – H	12	10	STD	2	0	0	$35414 + \dot{m}_{IF}$

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

#### 4.6 Válvulas de alivio de la planta C-1

En el análisis de esta planta motocompresora, las válvulas de alivio se encuentran protegiendo las unidades motocompresoras en todas sus etapas y el separador, por ende, a continuación, se presentan una tabla describiendo cada válvula utilizada en el sistema de alivio.

**Tabla 4.***Válvulas de seguridad de las unidades motocompresoras de la planta C-1*

<b>Unidades: K1 y K2</b>					
<b>Ubicación válvula</b>	<b>Modelo</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Presión de Disparo</b>	<b>Cantidad</b>
Descarga 1 <sup>ra</sup> Etapa	Axelson	1 ½" - 300 RF	2" – 150 RF	495 psi	2
Descarga 2 <sup>da</sup> Etapa	Axelson	1" - 600 RF	1 ½" – 1500 RF	1200 psi	2
Descarga 3 <sup>ra</sup> Etapa	Axelson	1 ½" – 1500 RTJ	1 ½" – 300 RF	2200 psi	2
<b>Unidades: K3 y K4</b>					
<b>Ubicación válvula</b>	<b>Modelo</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Presión de Disparo</b>	<b>Cantidad</b>
Descarga 1 <sup>ra</sup> Etapa	Axelson	2" – 300 RF	2" – 150 RF	495 psi	2
Descarga 2 <sup>da</sup> Etapa	Axelson	1" – 600 RF	1 ½" – 150 RF	1200 psi	2
Descarga 3 <sup>ra</sup> Etapa	Axelson	1" – 1500 RTJ	1 ½" – 300 RF	2200 psi	2
Descarga 4 <sup>ta</sup> Etapa	Axelson	1" – 1500 RTJ	2" – 300 RF	2200 psi	2
<b>Unidades: K5 y K6</b>					
<b>Ubicación válvula</b>	<b>Modelo</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Presión de Disparo</b>	<b>Cantidad</b>
Descarga 1 <sup>ra</sup> Etapa	Mercer	2"	3"	495 psi	2
Descarga 2 <sup>da</sup> Etapa	Mercer	1 ½"	2"	1200 psi	2
Descarga 3 <sup>ra</sup> Etapa	Mercer	1 ½"	1 ½"	2200 psi	2

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

**Tabla 5.***Válvula de alivio sobre el separador de la planta C-1.*

<b>Marca</b>	Teledyne Farris
<b>Tipo</b>	26LA10 – 120 (Series 2600)
<b>Serial</b>	310182 – 2 – A10
<b>Orificio</b>	3L4 (3"x4")
<b>Área del Orificio</b>	3,17 in <sup>2</sup> / 2045 mm <sup>2</sup>
<b>Capacidad</b>	5659 SCFM
	(@ 10% de Sobrepresión)
<b>Presión Prefijada de Apertura</b>	66 psig

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

**Tabla 6.***Cálculo de la relación Cp/Cv del gas natural a la succión de la planta C-1.*

<b>Componente</b>	<b>Formula</b>	<b>Fracción Molar %</b>	<b>Peso Molecular</b>	<b>Temperatura Crítica Kelvin</b>	<b>Presión Crítica Kpa</b>	<b>Cp/Cv</b>	<b>Poder Calorífico Neto Kj/kg:mol</b>
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1,87	44,011	304,2	7385	1,3	0
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	5,47	28,016	126,3	3383	1,4	0
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0	2,016	33,2	1320	1,33	2,29E+08
Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S	0	34,082	373,5	9013	1,31	4,91E+08

Componente	Formula	Fracción Molar %	Peso Molecular	Temperatura Crítica Kelvin	Presión Crítica Kpa	Cp/Cv	Poder Calorífico Neto Kj/kg:mol
Metano	CH <sub>4</sub>	89,75	13,034	190,7	4629	1,31	7,61E+08
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	0	32,042	512	8097	1,23	6,41E+08
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0	26,078	309,1	6237	1,25	1,19E+09
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0	28,054	282,4	5070	1,2	1,25E+09
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,97	30	305,4	4884	1,13	1,35E+09
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,72	44,097	370	4256	1,18	1,94E+09
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,04	58,124	408,1	3648	1,19	2,51E+09
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	58,124	425,2	3506	1,08	2,52E+09
i-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,02	72,15	460,4	3381	1,08	3,09E+09
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,02	72,15	469,7	3365	1,12	3,10E+09
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0	78,108	561,8	4854	1,03	3,00E+09
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,04	86,177	506,4	3030	1,06	3,68E+09
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	0,01	92,134	593,8	4207	1,05	3,57E+09
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0,02	100,04	539,2	2740	1,05	4,27E+09
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0,01	114,231	568,4	2490	1,05	4,85E+09
Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	0,01	128,258	594,7	2280	1,04	5,43E+09
Decano	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0	142,285	617,7	2100	1,03	6,01E+09
Ciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0,01	70,134	511,6	4808	1,08	2,94E+09
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0,01	84,161	553,5	4073	1,07	3,50E+09
Agua	H <sub>2</sub> O	0	18,015	647,1	22064	1,33	0
<b>Mezcla de propiedades</b>		100,0	1455,521	10264,4	120820	27,9	56322000000

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

## 5. Evaluación

La evaluación de la planta C-1 surge por la modificación de la red de los compresores debido al aumento de capacidad de compresión, que se consiguió por medio de la instalación de dos unidades motocompresoras nuevas, por ende, aumentó el número de compresores de cuatro a seis. A pesar de que se realizó esta ampliación, los sistemas de alivio siguen siendo los mismos del diseño original de la planta, por lo tanto, existe la incertidumbre de si el sistema alivio será capaz de suplir de manera efectiva alguna contingencia de sobrepresión para que pueda proteger los equipos de la planta.

Después de tener en cuenta las características de la planta compresora C-1, se realizó un análisis de todas las posibles contingencias por sobrepresión que se consideran en la norma API 521 y se llegó a la conclusión que las causas con mayor criticidad son por salida del recipiente bloqueada y fuego exterior en el recipiente a presión como se muestra en la tabla 7.

En este trabajo, se estudiará el comportamiento del sistema de alivio considerando la configuración actual de la planta que son los seis compresores operando y una configuración de máximo flujo (en la que se desea determinar el máximo caudal que puede manejar el sistema de alivio sin fallar).

**Tabla 7.**

*Análisis cualitativo de criticidad de los posibles escenarios de sobrepresión a considerar en la evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.*

N°	Condición	Análisis	Criticidad
1	Salidas de recipientes cerradas	Debe tomarse en consideración todo el flujo de gas que entra en el recipiente, más el proveniente de las unidades compresoras, a sus respectivas condiciones de alivio.  (Cargas de alivio: Elevadas, Temperaturas de alivio: Bajas)	Alta
2	Falla del enfriamiento por agua del condensador (Refrigerante)	No aplica	
3	Falla del reflujo al tope (Torre de fraccionamiento)	No aplica	
4	Falla del reflujo de la corriente lateral (Torre de fraccionamiento)	No aplica	
5	Falla en la absorción de hidrocarburos por parte del aceite pobre	No aplica	
6	Acumulación de no condensables	No aplica	
7	Entrada de material altamente volátil	No aplica	
8	Rebose de tanque de almacenamiento y del tanque de protección	No aplica	

Nº	Condición	Análisis	Criticidad
9	Falla en los controles automáticos	En el peor de los casos, solo involucraría el alivio de las unidades compresoras, generado por la pérdida de control de la operación. (Cargas de alivio: Bajas, Temperaturas de alivio: Bajas)	Baja
10	Entrada de vapor o calor anormal	No aplica	
11	Rotura de tubos en el intercambiador (Intercambiador de calor)	No aplica	
12	Explosiones internas	No aplica	
13	Reacciones químicas	No aplica	
14	Expansión hidráulica	No aplica	
15	Fuego exterior	Debe calcularse la carga de alivio proveniente del recipiente y de las unidades compresoras, a sus respectivas condiciones de alivio. (Cargas de alivio: Bajas, Temperaturas de alivio: Extremadamente elevadas)	Alta
16	Falla en la potencia (vapor, electricidad, etc.)	Sólo involucraría el alivio de las unidades compresoras, generado básicamente por la falla en el enfriamiento de las mismas. (Cargas de alivio: Bajas, Temperaturas de alivio: Moderadas)	Media

*Nota.* Adaptado de Viggiani Pérez, (2010). Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora C-1.

### 5.1 Fuego exterior en el recipiente

El fuego exterior es una causa de sobrepresión muy probable en este caso de la planta compresora C-1, por lo tanto, se debe tener un sistema de alivio apropiado que compense este tipo de falla y conocer cuáles medidas se deben tomar. En el caso específico de fuego exterior, se deben calcular primero las condiciones de presión y temperatura en las que el gas será aliviado del recipiente sometido al fuego, que en este caso sería el separador.

La temperatura de alivio  $T_1$  se puede determinar mediante la ecuación 5:

$$T_1 = \left( \frac{P_1}{P_n} \right) T_n$$

Donde:

$P_1$ : Presión absoluta de alivio de la válvula, (psia)

$P_n$ : Presión absoluta de operación del recipiente (psia)

$T_n$ : Temperatura absoluta de operación del recipiente (R)

Por lo tanto:

$$P_n = 40 \text{ psig} = 54,7 \text{ psia}$$

$$T_n = 98 \text{ °F} = 558,0 \text{ R} = 36,7 \text{ °C}$$

$$P_{set} = 66 \text{ psig (Presión prefijada de apertura)}$$

En este tipo de casos se permite una sobrepresión de 21% de la presión prefijada de apertura (0,21  $P_{set}$ ), para válvulas de alivio individuales, pero para este caso en específico, se optó por utilizar una sobrepresión del 10% debido a que se obtuvo un área efectiva de descarga más grande,

así como también una carga de alivio más elevada, por lo tanto, este diseño del sistema de alivio es conservador.

Por lo tanto:

$$P_{set} = 66 \text{ psig}$$

Sobrepresión = 10%

Entonces la presión de alivio será,

$$P_1 = (1 + 0.1)P_{set} + P_{atm} \quad (23)$$

$$P_1 = (1 + 0.1) * (66 \text{ psig}) + 14.7 \text{ psia}$$

$$\mathbf{P_1 = 72.6 \text{ psig}}$$

Así mismo, se determinará la temperatura de alivio de acuerdo con la ecuación 5:

$$T_1 = \left(\frac{P_1}{P_n}\right) T_n$$

$$T_1 = \left(\frac{87,3}{54,7}\right) (558 \text{ R})$$

$$T_1 = 890,6 \text{ R} = 430,6 \text{ }^\circ\text{F} = 221,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, las condiciones de alivio son las siguientes:

$$P_1 = 87,3 \text{ psia}$$

$$T_1 = 221,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Conocida la presión y temperatura de alivio del sistema, se debe determinar cuál es el área de descarga que se debe disponer, cada fallo tiene una manera específica de calcular esta área, en el caso del área de descarga de válvulas de alivio para recipientes a presión que contienen únicamente gases o vapores sometidos a la contingencia por fuego exterior, puede ser estimada utilizando la ecuación 1.

$$A = \frac{F' A'}{\sqrt{P_1}}$$

Donde:

A: Área efectiva de descarga de la válvula, [in<sup>2</sup>]

A': Área del recipiente expuesta al fuego, [ft<sup>2</sup>]

F': Puede ser determinado usando la Ecuación 2.

La constante C es una relación entre los calores específicos, que puede ser obtenida mediante la Ec. 3.

$$C = 520 * \sqrt{r * \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}}$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Evaluando la ecuación anterior para  $\gamma = 1,31$  (Ecuación 11) se obtiene la constante C,

$$C = 520 * \sqrt{(1.31) * \left(\frac{2}{1.31 + 1}\right)^{\left(\frac{1.31-1}{1.31+1}\right)}}$$

$$C = 347.9$$

Luego, considerando que:  $T_w = 1100 \text{ }^\circ\text{F} = 1560 \text{ R}$  podemos hallar  $F'$  con la siguiente ecuación:

$$F' = \left(\frac{0,1406}{CKd}\right) \left(\frac{(T_w - T_1)^{1,25}}{T_1^{0,6506}}\right)$$

$$F' = \left(\frac{0,1406}{(347,9)(0,975)}\right) \left(\frac{(1560 - 890,6)^{1,25}}{890,6^{0,6506}}\right)$$

$$F' = 0,017$$

Por lo tanto, el área del recipiente a presión expuesta al fuego se puede calcular de la siguiente manera:

$$A' = \pi Dh + \frac{\pi D^2}{4} \quad (24)$$

Donde:

D: Diámetro del recipiente a presión, [ft]

h: Altura del recipiente expuesta al fuego, [ft], (considerando sólo hasta 25 ft)

Ahora, considerando que el diámetro y la altura del recipiente son:

$$D = 72 \text{ in} = 6 \text{ ft} \text{ y } h = 283 \text{ in} = 23,58 \text{ ft}$$

Por lo tanto,

$$A' = \pi(6 \text{ ft})(23,58 \text{ ft}) + \frac{\pi(6 \text{ ft})^2}{4}$$

$$A' = 501,1 \text{ ft}^2$$

Ahora, la carga de alivio se puede calcular en [lb/h] de la siguiente manera:

$$W = 0,1406\sqrt{M_w P_1} \left( \frac{A'(T_w - T_1)^{1,25}}{T_1^{1,1506}} \right)$$

Teniendo en cuenta que el peso molecular del gas es:

$$M_w = 17,85 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Entonces la carga de alivio es:

$$W = 0,1406\sqrt{(17,85)(87,3)} \left( \frac{(501,1)(1560 - 890,6)^{1,25}}{(890,6)^{1,1506}} \right)$$

$$W = 3823,7 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$W = 1738,1 \frac{kg}{h}$$

Finalmente, el área efectiva de descarga de la válvula puede ser calculada mediante la ecuación 1 así:

$$A = \frac{F'A'}{\sqrt{P1}}$$
$$A = \frac{(0,017)(501,1)}{\sqrt{87,3}}$$
$$A = 0,912 \text{ in}^2$$

## 5.2 Configuración original

Ya una vez calculadas las condiciones de alivio y la carga que se tiene que aliviar desde el recipiente sometido a fuego (separador), se optó por determinar el perfil de contrapresiones generado en el sistema en su configuración original (ver resultados de la tabla 8). Por lo tanto, para realizar mejor el análisis, se discretizó el sistema en tramos como se puede ver en la figura 9 en donde se calculó la presión aplicando el modelo isotérmico para flujo compresible, partiendo desde la estaca (S) hacia el separador (DE) y los compresores. En el anexo B se presentan todos los cálculos debidos paso a paso para la configuración original.

Figura 10.

Esquemático para la configuración original del caso: fuego exterior.

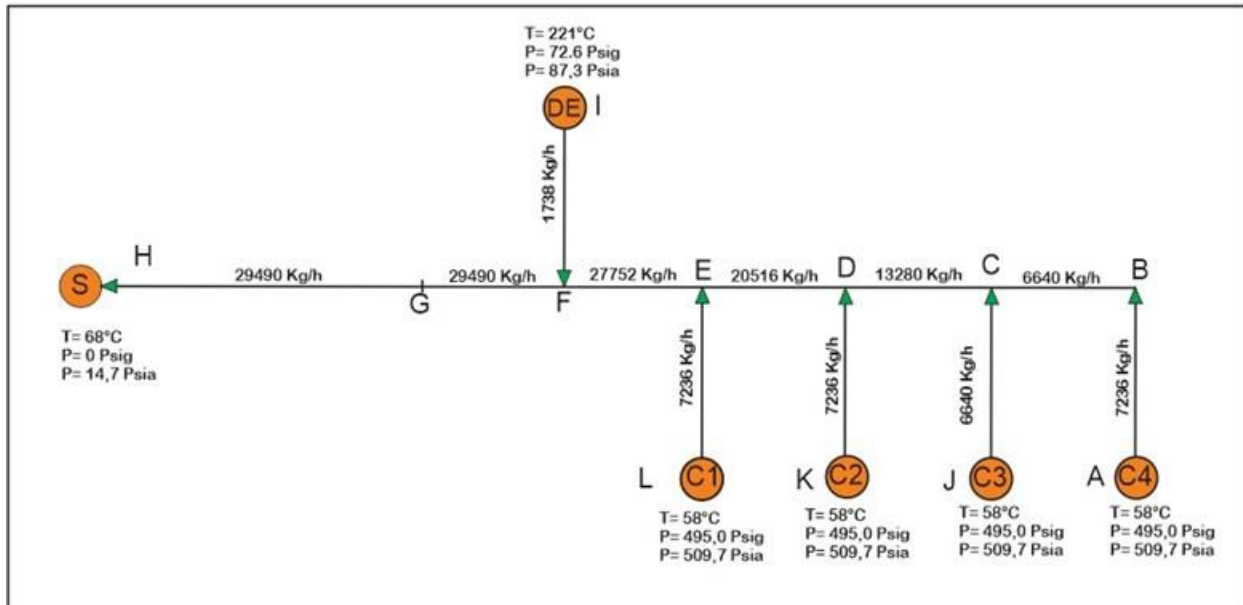


Tabla 8.

Cálculos para la configuración original del caso: fuego exterior

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	T(°K)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psig)
H-G	10	254	519,08	29490	0,64	68	341,15	14,70	1,03	101,35	46,93	
G-F	10	254	5,00	29490	0,15	68	341,15	61,63	4,33	424,94	47,20	
F-I	4	101,6	42,90	1738	0,07	221	494,15	61,90	4,35	426,78	48,58	
F-E	10	254	3,00	27752	0,14	58	331,15	63,28	4,45	436,28	<b>48,71</b>	<b>72,60</b>
E-D	10	254	12	20516	0,10	58	331,15	63,41	4,46	437,20	49,00	
D-C	10	254	14,03	13280	0,07	58	331,15	63,70	4,48	439,19	49,14	
C-B	10	254	12	6640	0,03	58	331,15	63,84	4,49	440,16	49,17	
B-A	4	101,6	31,19	6640	0,20	58	331,15	63,87	4,49	440,36	<b>58,33</b>	<b>490,00</b>

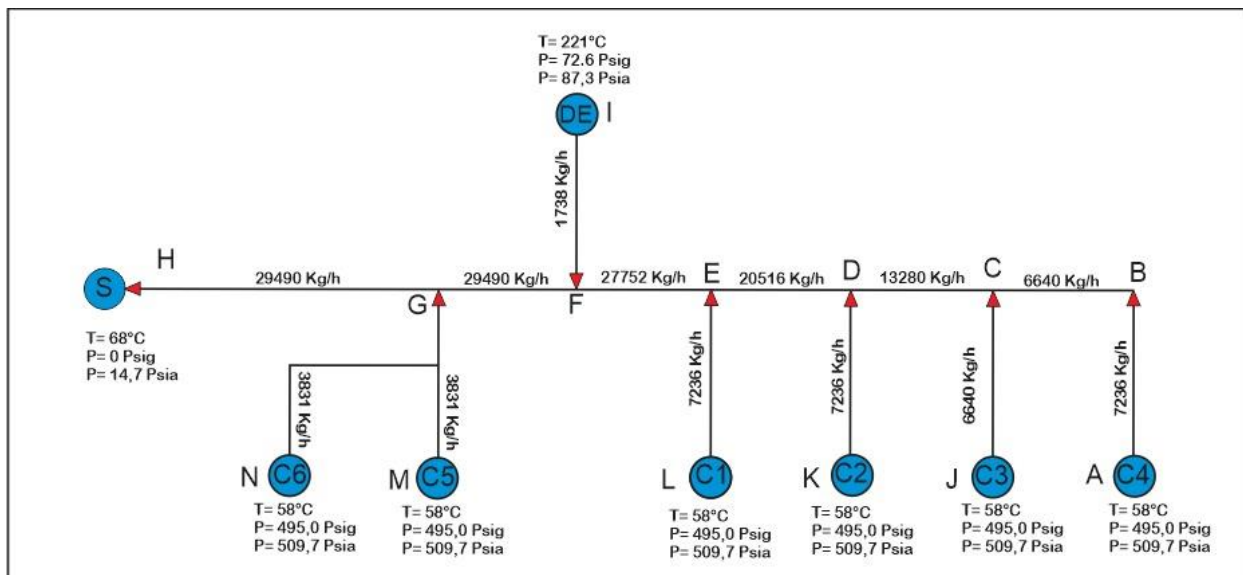
TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	T (°K)	P2 (psia)	P2 (KgF/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kpas)	P1 (psig)	Palivio (psig)
C-J	4	101,6	31,19	6640	0,18	58	331,15	73,03	5,13	503,51	<b>66,40</b>	<b>490,00</b>
D-K	4	101,6	31,19	7236	0,17	58	331,15	81,10	5,70	559,15	<b>75,03</b>	<b>490,00</b>
E-L	4	101,6	31,19	7236	0,16	58	331,15	89,73	6,31	618,69	<b>82,87</b>	<b>490,00</b>

### 5.3 Configuración actual

Ahora se realizó el estudio del sistema de alivio teniendo en cuenta la configuración actual que consiste en la implementación de las unidades motocompresoras 5 y 6, con sus respectivas cargas de alivio como se puede ver en la figura 10. De igual manera que en el caso de la configuración original, se utilizó el modelo isotérmico para flujo compresible para realizar el perfil de contrapresiones del sistema.

Figura 11.

Esquemático para la configuración actual del caso: fuego exterior



**Tabla 9.**

*Cálculos para la configuración actual del caso: fuego exterior.*

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	10	254	519,08	37152	<b>0,80</b>	68	14,700	1,03	101,35	62,49	
G-F	10	254	5,00	29490	0,12	68	77,191	5,43	532,21	62,70	
F-I	4	101,6	42,90	1738	0,05	221	77,402	5,44	533,67	63,81	
F-E	10	254	3,00	27752	0,11	58	78,506	5,52	541,28	<b>63,91</b>	<b>72,60</b>
E-D	10	254	12	20516	0,08	58	78,613	5,53	542,02	64,15	
D-C	10	254	14,03	13280	0,05	58	78,845	5,54	543,62	64,26	
C-B	10	254	12	6640	0,03	58	78,959	5,55	544,40	64,28	
B-A	4	101,6	31,19	6640	0,16	58	78,983	5,55	544,57	<b>71,77</b>	<b>490,00</b>
C-J	4	101,6	31,19	6640	0,15	58	86,471	6,08	596,20	<b>78,63</b>	<b>490,00</b>
D-K	4	101,6	31,19	7236	0,15	58	93,335	6,56	643,52	<b>86,18</b>	<b>490,00</b>
E-L	4	101,6	31,19	7236	0,14	58	100,882	7,09	695,55	<b>93,18</b>	<b>490,00</b>
G-O	3	76,2	23,73	7662	0,25	58	107,882	7,59	743,82	<b>117,56</b>	
O-M	3	76,2	19,42	3831	0,10	58	132,264	9,30	911,93	<b>121,85</b>	<b>490,00</b>
O-N	3	76,2	25,42	3831	0,10	58	136,550	9,60	941,48	<b>127,26</b>	<b>490,00</b>

#### 5.4 Fallo en el sistema

En este caso, para determinar hasta cuando el sistema de alivio con el que actualmente la planta compresora de gas natural C-1 cuenta es efectivo, decidimos investigar cual sería la carga de alivio máxima a la cual, el sistema de alivio seguiría siendo eficiente. Para esto entonces, en nuestra hoja de cálculo realizamos el proceso, el cual consistía en ir aumentando progresivamente la carga de alivio en el punto G del sistema, (ver figura 10), provenientes de los compresores C5

y C6, esto con el fin de que al ir agregando carga adicional este provocara el fallo, es decir, hasta conseguir que la contrapresión en una de las válvulas de alivio se igualara, a la presión de alivio de esta.

Inicialmente se comenzó aumentando 1000 kg/h la carga de alivio, para determinar dicha presión y se obtuvo lo siguiente. En la configuración actual de la planta de gas la cual cuenta con 6 compresores, cada uno de ellos aportando cargas de alivio, en el punto G de la figura 10. En el tramo H-G, la carga de alivio es de 37152 kg/h, a partir de esta carga comenzamos nuestro aumento progresivo de la carga, hasta observar que las presiones de alivio y contrapresión se igualaran.

**Tabla 10.**

*Aumento carga de alivio en 1000kg/h*

TRAMO	M(kg/h)	P1(psig)	Palivio(psig)
H-G	38152	64,54	
F-E	27752	65,92	72,6

Vemos claramente que al aumentar la carga de alivio a 1000 kg/h demás, el sistema sigue siendo viable y eficiente en el desarrollo del proceso de compresión del gas natural, ahora seguidamente de esto, continuamos aumentando de manera progresiva ahora a 2500 kg/h, quedando la carga en el tramo H-G como se observa en la figura 10 en 39652 kg/h. Posterior a esto se hará la evaluación de las presiones, teniendo como resultado:

**Tabla 11.**

*Aumento carga de alivio en 2500 kg/h.*

TRAMO	M(kg/h)	P1(psig)	Palivio(psig)
H-G	39652	67,62	
F-E	27752	68,95	72,6

Visiblemente podemos observar que al hacer este nuevo aumento nos estamos acercando cada vez más al punto crítico, en el cual las presiones de alivio y contrapresión del sistema en el punto D-E, se igualarán y en el cual el sistema de alivio de presión de la planta compresora de gas se convertirá en un sistema ineficiente y obsoleto. Ahora bien, continuamos aumentando la carga de alivio para determinar cuál es ese valor máximo al cual el sistema podría llegar y operar de manera eficiente sin que se presenten fallas en el sistema.

De esta manera, y aumentando la carga de alivio a 4200 kg/h, podremos determinar qué:

**Tabla 12.**

*Aumento carga de alivio en 4200kg/h*

TRAMO	M(kg/h)	P1(psig)	Palivio(psig)
H-G	41352	71,11	
F-E	27752	72,39	72,6

Estamos próximos a conseguir el punto crítico, en la cual estamos forzándolo para que alcance la condición de límite de operatividad, específicamente en la válvula instalada en el recipiente de presión D-E.

Ahora bien, para determinar dicho valor de carga de alivio el cual permita determinar la máxima capacidad que puede manejar la planta compresora C-1 sin que su sistema de alivio falle, por medio de prueba y error mediante la herramienta Excel, se siguió aumentando de manera progresiva la carga de alivio hasta que llegasen a igualarse las presiones de alivio y la de sobrecarga, en lo que se concluyó que la máxima capacidad que puede manejar la planta compresora de gas C-1 es la siguiente:

**Tabla 13.**

*Aumento máximo carga de alivio en 4300 kg/h.*

TRAMO	M(kg/h)	P1(psig)	Palivio(psig)
H-G	41452	71,32	
F-E	27752	72,60	72,6

De esta manera, y aumentando la carga de alivio a 4300 kg/h aproximadamente, podremos determinar qué la máxima capacidad que puede manejar actualmente la planta compresora de gas C-1, para que el sistema de alivio no falle es 41452 kg/h.

**Tabla 14.**

*Cálculos para la configuración actual del caso: fuego exterior*

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	10	254	519,08	41452	0,89	68	14,700	1,03	101,35	71,32	
G-F	10	254	5,00	29490	0,11	68	86,018	6,05	593,07	71,51	

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
F-I	4	101,6	42,90	1738	0,05	221	86,207	6,06	594,37	72,50	
F-E	10	254	3,00	27752	0,10	58	87,199	6,13	601,22	<b>72,60</b>	<b>72,60</b>
E-D	10	254	12	20516	0,07	58	87,295	6,14	601,88	72,80	
D-C	10	254	14,03	13280	0,05	58	87,504	6,15	603,32	72,91	
C-B	10	254	12	6640	0,02	58	87,606	6,16	604,02	72,93	
B-A	4	101,6	31,19	6640	0,15	58	87,628	6,16	604,17	<b>79,70</b>	<b>490,00</b>
C-J	4	101,6	31,19	6640	0,14	58	94,404	6,64	650,89	<b>86,01</b>	<b>490,00</b>
D-K	4	101,6	31,19	7236	0,14	58	100,709	7,08	694,36	<b>93,02</b>	<b>490,00</b>
E-L	4	101,6	31,19	7236	0,13	58	107,721	7,57	742,71	<b>99,59</b>	<b>490,00</b>
G-O	3	76,2	23,73	7662	0,23	58	114,289	8,04	788,00	<b>122,74</b>	
O-M	3	76,2	19,42	3831	0,10	58	137,440	9,66	947,62	<b>126,87</b>	<b>490,00</b>
O-N	3	76,2	25,42	3831	0,09	58	141,566	9,95	976,06	<b>132,09</b>	<b>490,00</b>

### 5.5. Solución propuesta

En este apartado, tendremos en cuenta un cambio en la configuración del sistema, específicamente en el tramo H-G, en el cual se procede a realizar un cambio en el diámetro actual de la tubería con el fin mejorar las condiciones de operación en la planta de gas. Este cambio se debe principalmente a que se observó que en el desarrollo del proceso las condiciones en la que la tubería se encontraba operando no son las ideales, debido a que se estaban generando vibraciones en la tubería por el aumento de flujo en ella por los dos compresores adicionales en la planta, por lo que el número de Mach estaba excediendo el valor máximo recomendado, que es 0,5, generando como consecuencia vibraciones no deseadas durante las operaciones de alivio.

Tabla 15.

*Cálculos solución propuesta*

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Paivio(psia)
H-G	10	254	519,08	37152	<b>0,80</b>	68	14,700	1,03	101,35	62,49	
G-F	10	254	5,00	29490	0,12	68	77,191	5,43	532,21	62,70	
F-I	4	101,6	42,90	1738	0,05	221	77,402	5,44	533,67	63,81	
F-E	10	254	3,00	27752	0,11	58	78,506	5,52	541,28	<b>63,91</b>	<b>72,60</b>
E-D	10	254	12	20516	0,08	58	78,613	5,53	542,02	64,15	
D-C	10	254	14,03	13280	0,05	58	78,845	5,54	543,62	64,26	
C-B	10	254	12	6640	0,03	58	78,959	5,55	544,40	64,28	
B-A	4	101,6	31,19	6640	0,16	58	78,983	5,55	544,57	<b>71,77</b>	<b>490,00</b>
C-J	4	101,6	31,19	6640	0,15	58	86,471	6,08	596,20	<b>78,63</b>	<b>490,00</b>
D-K	4	101,6	31,19	7236	0,15	58	93,335	6,56	643,52	<b>86,18</b>	<b>490,00</b>
E-L	4	101,6	31,19	7236	0,14	58	100,882	7,09	695,55	<b>93,18</b>	<b>490,00</b>
G-O	3	76,2	23,73	7662	0,25	58	107,882	7,59	743,82	<b>117,56</b>	
O-M	3	76,2	19,42	3831	0,10	58	132,264	9,30	911,93	<b>121,85</b>	<b>490,00</b>
O-N	3	76,2	25,42	3831	0,10	58	136,550	9,60	941,48	<b>127,26</b>	<b>490,00</b>

Como se puede observar en la tabla 15, en el tramo H-G, el valor obtenido para el número Mach es de 0,8, el cual sobrepasa de manera considerable el valor recomendado 0,5. Por otra parte, ya conocida la configuración actual, al contar con 2 nuevos compresores en el sistema, genera un aumento en la carga en el tramo H-G e indirectamente un aumento en la presión de carga del sistema, por lo que se considera que la forma más viable de aliviar dicha carga y disminuir el número de Mach es llevando a cabo un cambio en el diámetro de la tubería.

Para este estudio, se decidió hacer una comparativa entre diferentes diámetros comerciales disponibles en el mercado para este tramo en específico y analizar el comportamiento del sistema de alivio en dichos cambios, con el fin de estudiar su factibilidad en el desarrollo del proceso mediante la disminución en la carga de la tubería y el número de Mach evitando las vibraciones.

A continuación, se mostrará la comparativa para diámetros comerciales de 12, 14 y 16 pulgadas y su elección quedará sujeta a la realización de análisis costo-beneficio.

**Tabla 16.**

*Cálculos para diámetro 10 in*

TRAMO	D(In)	D(mm)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	10	254	519,08	37152	<b>0,80</b>	68	14,700	1,03	101,35	62,49	
G-F	10	254	5,00	29490	0,12	68	77,191	5,43	532,21	62,70	
F-I	4	101,6	42,90	1738	0,05	221	77,402	5,44	533,67	63,81	
F-E	10	254	3,00	27752	0,11	58	78,506	5,52	541,28	<b>63,91</b>	<b>72,60</b>

**Tabla 17.**

*Cálculos para diámetro 12 in*

TRAMO	D(In)	D(m)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	12	0,305	519,08	37152	<b>0,56</b>	68	14,700	1,03	101,35	34,45	
G-F	10	0,254	5,00	29490	0,19	68	49,148	3,46	338,87	34,79	
F-I	4	0,102	42,90	1738	0,08	221	49,489	3,48	341,21	36,51	

TRAMO	D(In)	D(m)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T (°C)	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
F-E	10	0,254	3,00	27752	0,17	58	51,206	3,60	353,05	<b>36,67</b>	<b>72,60</b>

**Tabla 18.***Cálculos para diámetro 14 in*

TRAMO	D(In)	D(m)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T °C	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	14	0,356	519,08	37152	<b>0,41</b>	68	14,700	1,03	101,35	19,79	
G-F	10	0,254	5,00	29490	0,27	68	34,494	2,43	237,83	20,31	
F-I	4	0,102	42,90	1738	0,12	221	35,008	2,46	241,37	22,71	
F-E	10	0,254	3,00	27752	0,23	58	37,410	2,63	257,94	<b>22,95</b>	<b>72,60</b>

**Tabla 19.***Cálculos para diámetro 16 in*

TRAMO	D(In)	D(m)	Lt(m)	M(kg/h)	Ma	T °C	P2(psia)	P2(KgF/cm <sup>2</sup> )	P2(Kpas)	P1(psig)	Palivio(psia)
H-G	16	0,406	519,08	37152	<b>0,31</b>	68	14,700	1,03	101,35	11,68	
G-F	10	0,254	5,00	29490	0,35	68	26,381	1,85	181,89	12,42	
F-I	4	0,102	42,90	1738	0,15	221	27,118	1,91	186,97	15,48	
F-E	10	0,254	3,00	27752	0,29	58	30,179	2,12	208,08	<b>15,80</b>	<b>72,60</b>

Teniendo en cuenta las anteriores tablas en las cuales se hace la comparativa del funcionamiento del sistema de alivio de presión para diferentes diámetros en el tramo H-G, se pueden llegar a varias conclusiones para determinar el diámetro a seleccionar, ya que están sujetas a varios factores los cuales hacen que dicha selección se pueda llevar a cabo.

Primeramente, tenemos el parámetro del número Mach, en el cual se puede observar que para la configuración original tiene un valor elevado de 0,8 respecto al recomendado de 0,5. Luego al cambiar el diámetro de 10 a 12 pulgadas se logra evidenciar un cambio significativo en el valor de dicho número, el cual al ir aumentando progresivamente el diámetro del segmento H-G este de manera inversa disminuye notoriamente y está por debajo del valor máximo recomendado, por lo tanto, con un diámetro en la tubería del tramo H-G de 12 pulgadas o mayor corrige las vibraciones generadas por el alto número de Mach.

Por otra parte, tenemos el parámetro de la presión de carga en el sistema, que para la configuración actual teniendo en operación los 6 compresores esta se encuentra en la capacidad de operar sin ningún inconveniente puesto que el valor de la presión de sobrecarga está por debajo la presión máxima en el tramo que es 72,6 psia, pero a pesar de que opera por debajo del límite si está muy cercano, por lo que es buena opción aumentar ese rango entre el punto de operación y su límite.

Sin embargo, para llevar a cabo esta propuesta sujeta a varios factores, primero se debe estudiar su factibilidad y realizar un análisis costo-beneficio de esta, y así realizar la selección de dicho diámetro de la manera más indicada para un buen desarrollo del proceso.

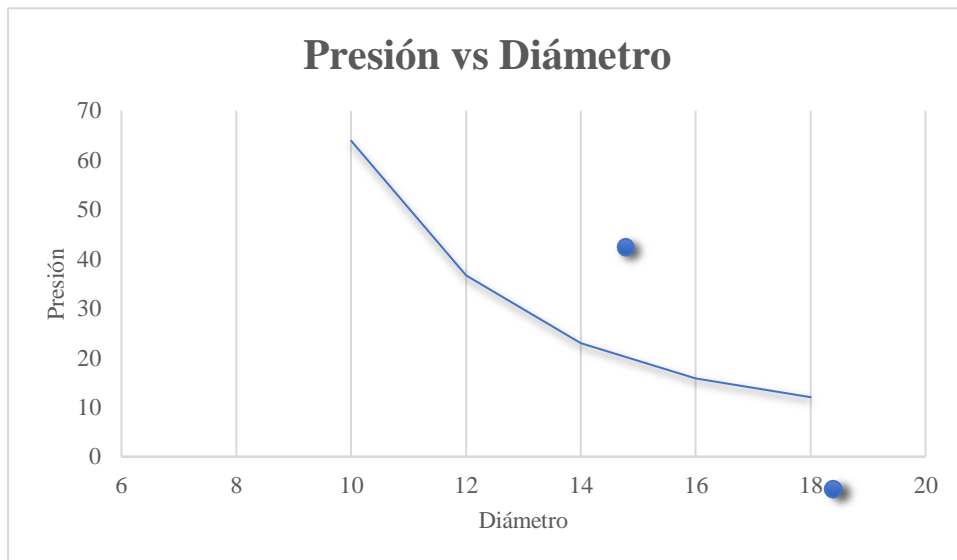
No obstante, teniendo en cuenta todos los análisis previos requeridos, se llegó a la conclusión que la mejor decisión para la selección del diámetro de la tubería en el tramo H-G, es la de 14 pulgadas, debido a que el número de Mach en dicho tramo es de 0,4, seguido de que la

presión de sobrecarga en el punto F-G, es mucho menor que la presión máxima de alivio en el mismo punto, de esta manera se mejora la operación de la planta desde los puntos analizados alejados de sus límites de funcionamiento.

La figura 12, nos muestra la relación que tiene la presión al verse modificado progresivamente el diámetro de la tubería en varias dimensiones, lo cual se puede concluir que a mayor diámetro de tubería menor será la presión de sobrecarga en el sistema, y por ende se tendrá menor velocidad lo cual contribuiría en la disminución de las vibraciones de este y a un correcto funcionamiento del proceso.

### Figura 12.

*Variación de la presión en las tuberías de alivio respecto a su diámetro*



## 6. Análisis del Caso

Ya conociendo previamente los resultados que se obtuvieron en el desarrollo de las diferentes configuraciones, primero (configuración original) con 4 compresores, y seguido (configuración actual) en donde la planta cuenta con 6 compresores, se obtuvieron las condiciones de alivio del equipo separador (DE), así mismo se determinó el área efectiva mínima de descarga que la válvula colocada en el recipiente debería tener, esto para cuando se presentara una falla de fuego exterior en el sistema.

Primeramente, se llevó a cabo una comparativa entre las áreas de la válvula instalada (proporcionada por fabricante) y el área mínima requerida (calculada), con el fin de determinar si el área de la válvula instalada en el dispositivo de separación era la indicada. Ahora bien, el área de la válvula de alivio instalada en el recipiente según el fabricante es de  $(3,7 \text{ in}^2)$  y el área mínima requerida calculada es de  $(0,9129 \text{ in}^2)$ . Puede notarse que la válvula instalada en campo cuenta con un área efectiva de descarga 3,5 veces mayor que la mínima necesaria.

Ahora bien, cuando se estudió la configuración original de la planta de procesamiento de gas, con cada uno de los perfiles de contrapresión calculados, se pudo identificar que las contrapresiones presentes en todas y cada una de las válvulas de alivio del sistema (DE, C1, C2, C3 Y C4), son menores que sus correspondientes presiones de alivio; a su vez entonces, se puede concluir que al haberse mantenido dicha configuración original, el sistema de alivio seguiría funcionando de manera correcta y respondiendo de manera eficiente ante cualquier tipo de contingencia de tipo fuego exterior que llegase a producirse.

Es relevante poder conocer cuál es el factor de seguridad, el cual por medio de este permitirá saber en qué medida el sistema de alivio se encuentra operando, respecto a la condición crítica. Este factor de seguridad está determinado por la siguiente ecuación, que relaciona las presiones de alivio de la válvula y la contrapresión (Viggiani Pérez, 2010).

$$\Psi = \frac{P_{Alivio (válvula i)}}{P_{Contrapresión (Válvula i)}} \quad (25)$$

Es decir, entre mayor sea este factor, podemos inferir que tendremos más seguridad en nuestro sistema, puesto que este estará operando cada vez más lejos de la condición crítica.

En la tabla 16, se logra evidenciar los factores de seguridad para la configuración original, y dan buen indicio puesto que cada tramo sobrepasa la unidad, lo cual es un indicativo de que el sistema de alivio existente en esta planta de procesamiento de gas natural tendrá una respuesta positiva para el caso estudiado, fuego exterior.

**Tabla 20.**

*Comparativo del factor de seguridad para cada válvula de alivio*

Válvula De Alivio	P <sub>alivio</sub> (psig)	P <sub>contrapresión</sub>	Ψ
D-E	72,6	48,27	<b>1,50</b>
C4	495,0	53,30	9,29
C3	495,0	57,47	8,61
C3	495,0	62,13	7,97
C1	495,0	66,50	7,44

También es claro resaltar el valor del factor de seguridad obtenido en la válvula de alivio D-E, el cual es mucho menor que los demás; esta válvula puede ser considerada como el dispositivo más delicado y propenso a fallar del sistema de alivio. De seguir aumentando la carga de alivio, la presión de alivio y la contrapresión, se igualarían antes, que en el resto de las válvulas del sistema.

De la misma manera se determinaron los factores de seguridad para el sistema de alivio de la configuración actual, el caso en el que se tienen 6 compresores operando.

**Tabla 21.**

*Comparativo del factor de seguridad para cada válvula de alivio.*

Válvula De Alivio	P <sub>alivio</sub> (psig)	P <sub>contrapresión</sub>	Y
D-E	72,6	63,34	<b>1,15</b>
C4	495,0	67,40	7,34
C3	495,0	70,85	6,99
C3	495,0	74,77	6,62
C1	495,0	78,52	6,30
C5	495,0	102,60	4,82
C6	495,0	106,23	4,66

Analizando la configuración actual, en la que fueron agregados dos compresores al sistema, se puede observar que esta configuración, aun habiendo aumentado el número de compresores (C5 y C6), respecto de la original, el factor de seguridad del sistema de alivio sigue siendo mayor a 1, es decir ( $1,15 > 1$ ), lo cual es un indicativo de que el sistema de alivio existente en esta planta de procesamiento de gas natural tendrá una respuesta positiva para el caso estudiado, fuego exterior.

A pesar de que el sistema de alivio sigue siendo efectivo para las nuevas condiciones de la planta operando con los seis compresores, no se descarta la posibilidad de reforzar el sistema de alivio, ya que si se analizan detalladamente los resultados, el recipiente DE se encuentra muy cercano a operar en condiciones críticas ya que el factor de seguridad no es tan alto, entonces lo recomendable sería reforzar el sistema de alivio de la planta compresora C-1 ya que prima la seguridad de la planta y su personal.

Finalmente, se decidió modificar los diámetros de la tubería de alivio para observar su comportamiento y las variables que se modificarían; debido al análisis ingenieril que se realizó se optó por aumentar el diámetro de la tubería lo que directamente solucionó dos posibles fuentes de problema, ya que la vibración que se generaba por estar operando por encima del número Mach máximo recomendable se reducen con solo aumentar el diámetro de la tubería al siguiente tamaño comercial; asimismo, el segundo factor que se mejoró, fue la velocidad del gas a la salida del segmento puesto que al tener un mayor diámetro la presión del tramo disminuirá ya que se tendrá una mayor área de descarga del gas.

## **7. Conclusiones**

En el desarrollo del caso estudio teniendo en cuenta la configuración actual y al analizar los resultados del perfil de contrapresiones obtenido, se pudo inferir que a pesar de que a la planta C-1 se le realizaron modificaciones, su operatividad en el sistema de alivio no se vio afectada

debido a que las presiones de alivio en el punto crítico F-E siempre fueron mayores hasta en 10 unidades de presión a las contrapresiones.

Al analizar la respuesta a la carga de alivio en el tramo H-G se observó que la máxima carga de alivio que puede soportar el sistema es 4,3 MMSCFD antes de que la presión de alivio y la contrapresión se igualen en el tramo D-E y el sistema falle; a pesar de que el sistema puede llegar a operar a este límite, no es conveniente puesto que el número de Mach tendría un valor elevado (0,89) superando el valor máximo recomendable (0,5).

En las condiciones actuales del sistema se logra evidenciar un incremento considerable en el número de Mach en el tramo H-G, lo cual no es conveniente para el adecuado desarrollo del proceso porque puede conllevar a posibles fallas debido a vibraciones no deseadas durante las operaciones de alivio; con el fin de evitar esta situación, se plantea el aumento del diámetro de la tubería en tramo H-G empleando valores comerciales desde (10 in hasta 16 in).

El aumento de los diámetros en la tubería del tramo H-G, traerá consigo beneficios primeramente en la disminución de la velocidad del gas, puesto que esta pasará de 312,458 m/s para el diámetro de 10 pulgadas a 216,890 m/s para diámetro de 12 pulgadas y de esta manera al ir aumentando dicho diámetro se tendrá una reducción significativa la cual se traducirá en una reducción en la presión de alivio y posibles fallas por vibraciones.

### Referencias

- Arias, C. (s.f.). *Guía de diseño para los sistemas de alivio de presión*. Academia.edu. Recuperado 16 de abril de 2021, de [https://www.academia.edu/9428873/GU%C3%8DA\\_DE\\_DISE%C3%91O\\_PARA\\_LOS\\_SISTEMAS\\_DE\\_ALIVIO\\_DE\\_PRESI%C3%93N](https://www.academia.edu/9428873/GU%C3%8DA_DE_DISE%C3%91O_PARA_LOS_SISTEMAS_DE_ALIVIO_DE_PRESI%C3%93N)
- Bahadori, Alireza. (s.f.). *Bypass Valve—An overview* / *ScienceDirect Topics*. Recuperado 16 de abril de 2021, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bypass-valve>
- Baizán Verdejo, A. (2019). *Dispositivos de alivio de presión. Verificación de los elementos de seguridad ante escenarios de sobrepresión en una instalación de proceso*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/180470>
- Chemical Engineering. (s.f.). *Facts at your fingertips*. Recuperado 16 de abril de 2021, de [https://www.chemengonline.com/Assets/File/CHE\\_Facts\\_0208.pdf](https://www.chemengonline.com/Assets/File/CHE_Facts_0208.pdf)
- Dispositivos de alivio de presión.pdf*. (s.f.).
- Emerson. (s.f.). *Guide-complete-guide-to-api-2350-rosemount-en-81138*. Recuperado 16 de abril de 2021, <https://www.emerson.com/documents/automation/guide-complete-guide-to-api-2350-rosemount-en-81138.pdf>
- Falatghareh (s.f.). *API-STD-521-2020.pdf*. Recuperado 19 de agosto de 2020, <https://falatghareh.ir/wp-content/uploads/2020/06/API-STD-521-2020.pdf>
- Grey, V. (Junio 01 de 2019). *Aplicación informática para el cálculo de la sobrepresión e impulso en explosiones de recipientes industriales*.

<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11485/Tesis%20Victor%20Santiago%20Ramirez%20Grey%20%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

*La guía del ingeniero para la medición de tanques Edición 2017.* (s.f.). 104.

Mahuzier Iommi, J.A. (2017). *Requerimientos sobre la resistencia al fuego y traspaso de humos en puertas usadas en los edificios*

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144282/Requerimientos-sobre-la-resistencia-al-fuego-y-traspaso-de-humos-en-puertas-usadas-en-los-edificios.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Monografias.com, lavin77. (s.f.). *Proceso y válvulas de estrangulamiento*. Recuperado 16 de abril de 2021, de <https://www.monografias.com/trabajos/valvestrangul/valvestrangul.shtml>

Montia, J. B. (s. f.). *Safety life cycle analysis applied to the engineering of pressure relief valves in process plants*. 256.

Oilfield Glossary. (s.f.). *Planta compresora*. Recuperado 18 de abril de 2021, [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/compressor\\_plant.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/compressor_plant.aspx)

Pérez, P. V. (s. f.). *Evaluación del sistema de alivio de la planta compresora c-1, operada por Petrodelta, Temblador, Edo. Monagas*. 146.

Pérez. (s.f.). *Evaluación del sistema de alivio de la planta Comp.*

Process Engineer: (s.f.). *Reflux Failure Case*. Recuperado 16 de abril de 2021, de <http://process-eng.blogspot.com/2012/04/causes-of-overpressure-reflux-failure.html>

Process Operations. (s.f.-a). *Fuentes comunes de sobrepresión*. Recuperado 16 de abril de 2021, de [https://www.processoperations.com/PresRelief/PR\\_Ch05.htm](https://www.processoperations.com/PresRelief/PR_Ch05.htm)

Scf Ingeniería. (s. f.). *Válvula de Seguridad con Bridas*. Recuperado 16 de abril de 2021, de [http://www.scfingenieria.com/uploads/6/5/3/6/6536844/526\\_serie\\_api\\_es.pdf](http://www.scfingenieria.com/uploads/6/5/3/6/6536844/526_serie_api_es.pdf)

Schwartz, M. P. (s.f.). *Four Types of Heat Exchanger Failures*. 6.

Scribd. (s.f.). *Plantas Compresores / Compresor de gas / Pistón*. Recuperado 18 de abril de 2021,

<https://es.scribd.com/document/124241800/Plantas-compresores>

Valve Magazine (s.f.). *Water Hammer*. Recuperado 16 de abril de 2021, de

<https://www.valvemagazine.com/magazine/sections/back-to-basics/8418-water-hammer.html>

Vdocuments. (s.f.). *API 752 Management of Hazards*. Recuperado 27 de abril de 2021, de

<https://vdocuments.mx/api-752-management-of-hazards.html>

Viggiani, P., & Yamilet Sánchez. (2011). *Evaluación del Sistema de Alivio de una Planta*

*Compresora de Gas Natural*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1086.1281>

Yañez, Gildardo. (s.f.). *Gases no condensables en un sistema de refrigeración*. Recuperado 16 de

abril de 2021, <https://www.gildardoyanez.com/tips/gases-no-condensables/>

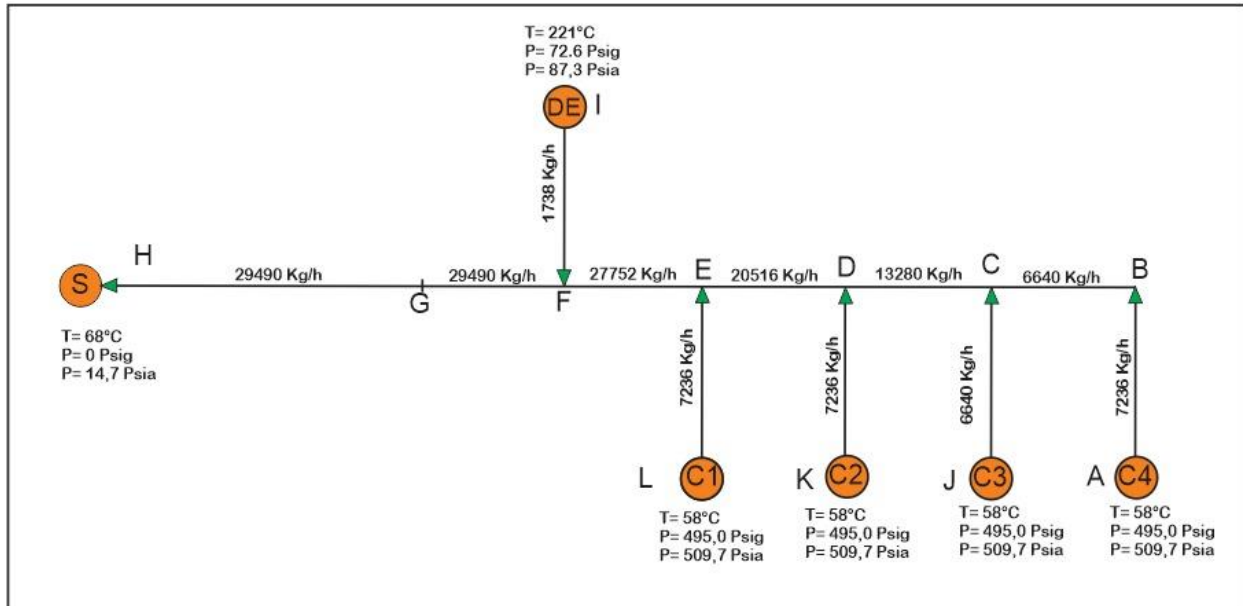
Apéndices

Apéndice A. Hoja de Especificaciones (Data Sheet) del Separador de la Planta C-1

10/12/04 15:18 FAX 214 353 8755		PEERLESS MFG. CO.		→ PEMCA		©001	
CUSTOMER - BENTON VINCCLER P A.			APPL. ENGINEER - ASBURY				
CUST. REF. - 5475-001			PEERLESS REV. - D/95-1536				
CUST. ITEM - PCU1-V08			AGENT REF. - P-5308				
Vessel Qty. - 1							
<b>OPERATING DATA</b>				<p style="text-align: center;">SA: GK</p> <p style="text-align: center;">PLAN VIEW</p>			
FLOW (MMSCFD)		55.0					
PRESSURE (PSIG)		40					
TEMPERATURE (F)		150					
SPEC. GRAV. (AIR=1)		0.60					
<b>VESSEL DESIGN DATA</b>							
CODE		ASME SECT 8 DIV 1					
PRESSURE (PSIG)		90					
TEMPERATURE (F)		-20/150					
CORR. ALLOWANCE		0.063					
RADIOGRAPHIC		100% ABW					
HEAT TREATMENT		NONE					
HYDRO TEST (PSIG)		135					
SANDBLAST		WHITE METAL					
PAINT		PRIME & 2 COAT					
CUSTOMER SPEC.		INQUIRY					
<b>MATERIAL SPECIFICATIONS</b>							
SHELL		SA-516-70					
HEADS		SA-516-70					
FLANGES		SA-105					
NOZZLES		SA-106-B					
COUPLINGS		SA-105					
VANES		SA-240-316					
(DR)							
<b>SCHEDULE OF OPENINGS</b>							
DIMENSIONS	ITEM QTY.		SIZE	RATING	TYPE	SERVICE	
	1	2					
A	93	1	20.000	150	RFWN	INLET	
B	155	2	20.000	150	RFWN	OUTLET	
C	234	3	20.000	150	RFWN	ACCESS	
D	283	4	4.000	150	RFWN	SYPHON	
E	228	5	4.000	150	RFWN	DRAIN	
		6	4.000	150	RFWN	PSV	
G	33	7	2.000	150	RFWN	BRIDLE	
		8	1.000	150	RFWN	VENT	
M	70						
N	72						
<p style="text-align: center;">ELEVATION</p>							
DIMENSIONS ARE APPROXIMATE NOT FOR CONSTRUCTION							
ITEM NO- A WT. EMPTY- 13382							
72 INCH ID, 90 PSIG VERTICAL GAS SEPARATOR							
SPEC NO.- D/95-1536 -A REV- 0 DATE-10/30/95							
<b>PEERLESS MFG. CO. - DALLAS, TEXAS</b>							
FORM: PMC-15A1							

Apéndice B. Cálculo del Perfil de Contrapresiones para la Configuración Original de la  
Planta C-1.

Caso: Fuego Exterior



**TRAMO H-G**

$$m = 29490,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PH) P_2 = 0,00 \text{ [psig]} = 14,70 \text{ [psia]} = 1,04 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \text{ a}$$

$$T_2 = 68,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 341,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 514,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 2 \text{ (L/D)EQ} = 10 \text{ LEQ} = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 0 \text{ (L/D)EQ} = 8 \text{ LEQ} = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \text{ (L/D)EQ} = 20 \text{ LEQ} = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

**Cálculos:**

$$\rho_2 = \frac{P_2 * MW}{ZRT_2}$$

$$\rho_2 = \frac{(1,033 \frac{KgF}{cm^2}) * (17,85 \text{ gmol}^{-1})}{(0,9979) * (8,314 \frac{J}{mol.K}) * (341,15K)}$$

$$\rho_2 = 0,006518 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 0,651823 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = \frac{M^*}{\rho_2}$$

$$Q_2 = \frac{29490 \frac{Kg}{h}}{0,651823 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$Q_2 = 45242,28 \frac{M^3}{h}$$

$$Q_2 = 12,56730158 \frac{m^3}{s}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{12,56730158 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi * (0,254 \text{ m})^2}{4}}$$

$$V_2 = 248,018 \frac{m}{s}$$

$$Re_2 = \frac{\rho_2 * v_2 * D}{\mu}$$

$$Re_2 = \frac{(0,651823 \frac{Kg}{m^3}) * (248,0188 \frac{m}{s}) * (0,254m)}{0,000011 \frac{Kg}{m.s}}$$

$$Re_2 = 3732982,798$$

$$F'_{calc} = \frac{1}{\left( -4 \log^* \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{1,256}{Re * \sqrt{F'_{sup}}} \right) \right)^2}$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,004662	14,20807
0,004662	0,004660	0,04272
<b>0,004660</b>	0,004660	0,000115

$$f = 4 * f'$$

$$f = 4 * (0,004660)$$

$$f = \mathbf{0,018641}$$

$$L_t = L + \sum_{i=1}^N L_{EQ(i)}$$

$$L_t = \mathbf{519,08 m}$$

$$M_{a2} = 3,23 \times 10^{-5} * \left( \frac{m^*}{p_2 * D^2} \right) \left( \frac{Z * T_2}{M_W} \right)^{0,5}$$

$$M_{a2} = 3,23 \times 10^{-5} * \left( \frac{29490 \frac{Kg}{h}}{101,353 Kpa * (0,254)^2} \right) \left( \frac{0,9979 * 341,15}{17,85 \frac{J}{mol.K}} \right)^{0,5}$$

$$M_{a2} = \mathbf{0,63616}$$

$$\frac{1}{Ma_2^2} * \left( \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 \right) * \left( 1 - \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 \right) - \ln \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 = \frac{FL_t}{D}$$

$$\frac{1}{Ma_2^2} * (\delta^2 - 1) - \ln(\delta^2) = 0$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left( \ln(\delta_{sup}^2) + \frac{FL_t}{D} \right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta$ Sup	$\delta$ Cal	Error
4,0000	4,1880952	4,49118707
4,188095	4,1925333	0,10585686
4,192533	4,1926355	0,00243849

$$\delta_{cal} = \mathbf{4,192635}$$

$$P1 = \delta_{cal} * P2$$

$$P1 = (4,192635) * 1,033 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = \mathbf{4,333327 \frac{KgF}{cm^2}}$$

$$P1 = 61,631742 \text{ Psia}$$

$$P1 = 46,931742 \text{ Psig}$$

### TRAMO G-F

$$m = 29490,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PG) P2 = 4,33 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$j_a = 61,49 \text{ [psia]} = 46,79 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 68,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 341,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 5,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 0 \text{ (L/D)EQ} = 10 \text{ LEQ} = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 0 \text{ (L/D)EQ} = 8 \text{ LEQ} = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \text{ (L/D)EQ} = 20 \text{ LEQ} = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = \frac{P_2 * MW}{ZRT_2}$$

$$\rho_2 = \frac{\left(4,333 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}\right) * (17,85 \text{ gmol}^{-1})}{(0,9979) * \left(8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}\right) * (339,15\text{K})}$$

$$\rho_2 = 0,027328 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 2,7328597 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = \frac{M^*}{\rho_2}$$

$$Q_2 = \frac{29490 \frac{Kg}{h}}{2,7328597 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$Q_2 = 10790,89 \frac{M^3}{h}$$

$$Q_2 = 2,997470 \frac{m^3}{s}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{2,997470 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi * (0,254 m)^2}{4}}$$

$$V_2 = 59,155838 \frac{m}{s}$$

$$Re_2 = \frac{\rho_2 * v_2 * D}{\mu}$$

$$Re_2 = \frac{(2,732859 \frac{Kg}{m^3}) * (59,155838 \frac{m}{s}) * (0,254m)}{0,000011 \frac{Kg}{m.s}}$$

$$Re_2 = 3732982,798$$

$$F'_{calc} = \frac{1}{\left( -4 \log^* \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{1,256}{Re * \sqrt{F'_{sup}}} \right) \right)^2}$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,004662	14,20807
0,004662	0,004660	0,04272
<b>0,004660</b>	0,004660	0,000115

$$f = 4 * f'$$

$$f = 4 * (0,004660)$$

$$f = \mathbf{0,018641}$$

$$L_t = L + \sum_{i=1}^N L_{EQ(i)}$$

$$. L_t = \mathbf{5 m}$$

$$M_{a2} = 3,23 \times 10^{-5} * \left( \frac{m^*}{p_2 * D^2} \right) \left( \frac{Z * T_2}{M_w} \right)^{0,5}$$

$$M_{a2} = 3,23 \times 10^{-5} * \left( \frac{29490 \frac{Kg}{h}}{424,9360 Kpa * (0,254)^2} \right) \left( \frac{0,9979 * 341,15}{17,85 \frac{J}{mol.K}} \right)^{0,5}$$

$$\frac{1}{Ma_2^2} * \left( \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 \right) * \left( 1 - \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 \right) - \ln \left( \frac{P1}{P2} \right)^2 = \frac{FL_t}{D}$$

$$M_{a2} = \mathbf{0,15173}$$

$$\delta = \frac{P1}{P2}$$

$$\frac{1}{Ma_2^2} * (\delta^2 - 1) - \ln(\delta^2) - \frac{FL_t}{D} = 0$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left( \ln(\delta_{sup}^2) + \frac{FL_t}{D} \right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,0355109	286,282767
1,035511	1,0050152	3,03435009
1,005015	1,0043302	0,06820624

$$\delta_{cal} = \mathbf{1,004330}$$

$$P1 = \delta_{Cal} * P2$$

$$P1 = (\mathbf{1,004330}) * 1,033 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = \mathbf{4,352091} \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 61,89861 \text{ Psia}$$

$$P1 = 47,19861 \text{ Psig}$$

### TRAMO: F - I

$$m = 1738,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PF) P2 = 4,35 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 61,75 \text{ [psia]} = 47,05 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 221,40 \text{ [}^\circ\text{C]} = 494,55 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 18,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 6 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 1,02 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 2 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 0,81 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Entrada} = 1 \quad (L/D)EQ = 169 \quad LEQ = 17,18 \text{ [m]}$$

$$D = 4 \text{ [in]} = 0,102 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,018948 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 1,89487 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 0,25478 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_2 = 31,426032 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_2 = 917,21120 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$Re2 = 550010,5207$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,005933	32,58505
0,005933	0,005915	0,306316
<b>0,005915</b>	<b>0,005915</b>	<b>0,002158</b>

$$f = 0023661$$

$$M_{a2} = 0,066975$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{FL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,0233093	290,888641
1,023309	1,0173158	0,58914801
<b>1,017316</b>	<b>1,0172899</b>	<b>0,00254619</b>

$$\delta_{cal} = 1,017316$$

$$P1 = 62,96884 \text{ Psia}$$

$$P1 = 4,427339 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$$

$$P1 = 48,268840 \text{ Psig}$$

### TRAMO: F - E

$$m = 27752,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PF) P2 = 4,35 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 61,75 \text{ [psia]} = 47,05 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 3,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 0 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 0 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \quad (L/D)EQ = 20 \quad LEQ = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,028764 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 2,876465 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_2 = 52,89020 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_2 = 9647,95 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$Q_2 = 2,6799 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Re_2 = 3512978,59$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,004664	14,23913
0,004664	0,004662	0,04544
<b>0,004662</b>	<b>0,004662</b> <b>.L<sub>t</sub> = 3 m</b>	<b>0,000129</b>

$$f = 0,018648$$

$$Ma_2 = 0,137695$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left( \ln(\delta_{sup}^2) + \frac{FL_t}{D} \right) * Ma_2^{2+1}}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,0279809	289,112269
1,027981	1,0026079	2,53070997
<b>1,002608</b>	<b>1,0021351</b>	<b>0,04717281</b>

$$\delta_{Cal} = 1,0021351$$

$$P1 = 4,436792 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 63,10328 \text{ Psia}$$

$$P1 = 48,40328 \text{ Psig}$$

### TRAMO: E - D

$$m = 20516,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PE) P2 = 4,36 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 61,89 \text{ [psia]} = 47,19 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 0 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 0 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \quad (L/D)EQ = 20 \quad LEQ = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,028826 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 2,882607 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 7117,16 \frac{M^3}{h}$$

$$Q_2 = 1,97699 \frac{m^3}{s}$$

$$V_2 = 39,016417 \frac{m}{s}$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,004674	14,42391
0,004674	0,004671	0,061824
<b>0,004671</b>	<b>0,004671</b>	<b>0,000236</b>

$$Re = 22597011,702$$

$$f = 0,01869$$

$$.L_t = 12 m$$

$$M_{a2} = 0,101576$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{fL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,0186831	292,663829
1,018683	1,0047339	1,38834641
<b>1,004734</b>	<b>1,0045923</b>	<b>0,01409539</b>

$$\delta_{cal} = 1,0045923$$

$$P1 = 63,393073 \text{ Psia}$$

$$P1 = 4,457167 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 48,693073 \text{ Psig}$$

**Tramo: D – C**

$$m = 13280,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PD) P2 = 4,38 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p_a = 62,18 \text{ [psia]} = 47,48 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 0 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 1 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \quad (L/D)EQ = 20 \quad LEQ = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

**Cálculos:**

$$\rho_2 = 0,028958 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 2,89584 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 1,27385 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_2 = 4585,880 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$V_2 = 25,13986 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = 1681044,814$$

<b>F'sup</b>	<b>F'cal</b>	<b>Error</b>
0,004000	0,004695	14,80409
0,004695	0,004691	0,096605
<b>0,004691</b>	<b>0,004691</b>	<b>0,00056</b>

$$f = 0,01876$$

$$.L_t = 14,03 \text{ m}$$

$$M_{a2} = 0,065449$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{FL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

<b>δSup</b>	<b>δCal</b>	<b>Error</b>
4,0000	1,0078065	296,901582
1,007807	1,00193	0,5865216
<b>1,00193</b>	<b>1,001905</b>	<b>0,00249559</b>

$$P1 = 4,465657 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 63,51383 \text{ Psia}$$

$$P1 = 48,8138 \text{ Psig}$$

### **Tramo: C – B**

$$m = 6640,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PC) P2 = 4,39 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 62,33 \text{ [psia]} = 47,63 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 0 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 2,54 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 0 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 2,03 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Tees} = 0 \quad (L/D)EQ = 20 \quad LEQ = 5,08 \text{ [m]}$$

$$D = 10 \text{ [in]} = 0,254 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,02901 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 2,901361 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 2288,5807 \frac{M^3}{h}$$

$$Q_2 = 0,63571 \frac{m^3}{s}$$

$$V_2 = 12,546033 \frac{m}{s}$$

$$Re = 840522,40$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,004753	15,8405
0,004753	0,004743	0,198664
<b>0,004743</b>	<b>0,004744</b>	<b>0,002196</b>

$$f = 0,01897$$

$$.L_t = 12 \text{ m}$$

$$M_{a2} = 0,032662$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,0019552	299,219436
1,001955	1,0004801	0,14743856
<b>1,00048</b>	<b>1,0004786</b>	<b>0,00015703</b>

$$P1 = 4,467794 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 63,54422 \text{ Psia}$$

$$P1 = 48,84422 \text{ Psig}$$

### TRAMO: B – A

$$m = 6640,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PB) P2 = 4,39 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 62,36 \text{ [psia]} = 47,66 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 1 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 1,02 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 1 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 0,81 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Entrada} = 1 \quad (L/D)EQ = 171 \quad LEQ = 17,36 \text{ [m]}$$

$$D = 4 \text{ [in]} = 0,102 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,029027 \text{ [Kg/Cm}^3\text{]}$$

$$\rho_2 = 2,902749 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 2287,48 \frac{M^3}{h}$$

$$Q_2 = 0,635412 \frac{m^3}{s}$$

$$V_2 = 78,37520 \frac{m}{s}$$

$$Re = 2101306,017$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,005858	31,71527
0,005858	0,005853	0,080735
<b>0,005853</b>	<b>0,005853</b>	<b>0,000155</b>

$$f = 0,02341$$

$$.L_t = 31,19 \text{ m}$$

$$Ma_2 = 0,20404$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{fL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,1202373	257,067195
1,120237	1,0718916	4,51031462
<b>1,071892</b>	<b>1,0701767</b>	<b>0,16024431</b>

$$\delta_{cal} = 1,0701767$$

$$P1 = 4,781329 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 68,00355 \text{ Psia}$$

$$P1 = 53,30355 \text{ Psig}$$

### TRAMO: C – J

$$m = 6640,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PC) P2 = 4,39 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p_a = 62,33 \text{ [psia]} = 47,63 \text{ [psig]}$$

$$T_2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 1 \quad (L/D)_{EQ} = 10 \quad LEQ = 1,02 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 1 \quad (L/D)_{EQ} = 8 \quad LEQ = 0,81 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Entrada} = 1 \quad (L/D)_{EQ} = 171 \quad LEQ = 17,36 \text{ [m]}$$

$$D = 4 \text{ [in]} = 0,102 \text{ [m]}$$

### Cálculos:

$$\rho_2 = 0,031064 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 3,106455 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 0,59374 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_2 = 2137,484 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$V_2 = 73,23575 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = 2101306,01$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,005858	31,71527
0,005858	0,005853	0,080735
<b>0,005853</b>	<b>0,005853</b>	<b>0,000155</b>

$$f = 0,02341$$

$$L_t = 31,19 \text{ m}$$

$$Ma_2 = 0,19066$$

$$\delta_{Cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{fL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,1057096	261,758649
1,10571	1,062595	4,05747795
<b>1,062595</b>	<b>1,0612334</b>	<b>0,12830068</b>

$$\delta_{Cal} = 1,0612334$$

$$P1 = 5,074107 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 72,1676 \text{ Psia}$$

$$P1 = 57,46764 \text{ Psig}$$

### **TRAMO: D – K**

$$m = 7236,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PD) P2 = 4,38 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$j_a = 62,18 \text{ [psia]} = 47,48 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 1 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 1,02 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 1 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 0,81 \text{ [m]}$$

# Entrada = 1      (L/D)EQ= 171      LEQ = 17,36 [m]  
 D = 4 [in] = 0,102 [m]

**CÁLCULOS:**

$$\rho_2 = 0,032967 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 3,296674 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 0,609705 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_2 = 2194,939 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$V_2 = 75,204306 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = 2289917,22$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,005856	31,68914
0,005856	0,005851	0,0741
<b>0,005851</b>	<b>0,005851</b>	<b>0,000131</b>

$$f = 0,0234$$

$$.L_t = 31,19 \text{ m}$$

$$Ma_2 = 0,19578$$

$$\delta_{Cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{fL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{Sup}$	$\delta_{Cal}$	Error
4,0000	1,1111617	259,983605
1,111162	1,0660576	4,23093112
<b>1,066058</b>	<b>1,0645665</b>	<b>0,14006657</b>

$$\delta_{cal} = 1,064566$$

$$P1 = 5,401724 \frac{KgF}{cm^2}$$

$$P1 = 76,82725 \text{ Psia}$$

$$P1 = 62,12725 \text{ Psig}$$

### TRAMO: E - L

$$m = 7236,00 \text{ [kg/h]}$$

$$(PE) P2 = 4,36 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$]a = 61,89 \text{ [psia]} = 47,19 \text{ [psig]}$$

$$T2 = 58,00 \text{ [}^\circ\text{C]} = 331,15 \text{ [K]}$$

$$MW = 17,85 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Z = 0,9979$$

$$G = 1,31 \text{ (Cp/Cv)}$$

$$\mu = 0,011 \text{ [cpoise]} = 0,000011 \text{ [kg/m.s]}$$

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ [m]} = 0,2 \text{ [mm]}$$

$$L = 12,00 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Codos} = 1 \quad (L/D)EQ = 10 \quad LEQ = 1,02 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Válvulas} = 1 \quad (L/D)EQ = 8 \quad LEQ = 0,81 \text{ [m]}$$

$$\# \text{ Entrada} = 1 \quad (L/D)EQ = 171 \quad LEQ = 17,36 \text{ [m]}$$

$$D = 4 \text{ [in]} = 0,102 \text{ [m]}$$

**Cálculos:**

$$\rho_2 = 0,0350952 \text{ Kg/Cm}^3$$

$$\rho_2 = 3,509528 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_2 = 2061,815 \frac{\text{M}^3}{\text{h}}$$

$$Q_2 = 0,57272 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_2 = 70,64313 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = 2289917,22$$

F'sup	F'cal	Error
0,004000	0,005856	31,68914
0,005856	0,005851	0,0741
<b>0,005851</b>	<b>0,005851</b>	<b>0,000131</b>

$$f = 0,0234$$

$$.L_t = 31,19 \text{ m}$$

$$M_{a2} = 0,1839145$$

$$\delta_{cal} = \sqrt{\left(\ln(\delta_{sup}^2) + \frac{fL_t}{D}\right) * Ma_2^2 + 1}$$

$\delta_{sup}$	$\delta_{cal}$	Error
4,0000	1,0986704	264,076428
1,09867	1,0581403	3,83031291
<b>1,05814</b>	<b>1,0569381</b>	<b>0,11374506</b>

$$\delta_{cal} = 1,0569381$$

$$P1 = 5,70928 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$$

$$P1 = 81,2016 \text{ |Psia}$$

$$P1 = 66,50165 \text{ Psig}$$